le Scienze

Maggio 2020
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA RIVISTA MENSILE - NUMERO 621 - 1 MAGGIO 2020

Neuroscienze
Mappe neurali per orientarsi nella vita

Cosmologia
Il modello standard dell'universo è in crisi

Evoluzione
I nuovi geni non emergono sempre a partire dai vecchi

in copertina

Scienziati in tutto il mondo cercano di capire dove potrà verificarsi il prossimo spillover, anche con esperimenti controversi su virus pericolosi (*Illustrazione di Radoslav Zilinsky/Getty Images*)

Sommario

Maggio 2020 numero 621

10

17

91

SCIENZA NEWS

Auscape/Universal Images Group via Getty Images (*telescopio*); cortesia Ed Hengeveld (*scansione*)/NASA (*astronauti*); rclassenlayouts/iStock (*bicchiere*)

di Marco Cattaneo

Editoriale

Prepariamoci ai prossimi spillover

In futuro, altri virus potrebbero colpire in modo aggressivo l'umanità e dobbiamo essere pronti

«Quando un patogeno fa il salto da un animale a un essere umano e si radica nel nuovo organismo come agente infettivo, in grado talvolta di causare malattia o morte, siamo in presenza di una zoonosi. [...] È una parola del futuro, destinata a diventare assai più comune nel corso di questo secolo». Era il 2012 quando David Quammen scriveva queste parole nel primo capitolo del suo monumentale capolavoro *Spillover*, che nell'edizione italiana pubblicata da Adelphi nel 2014 ha in copertina, guarda il caso, un sinistro pipistrello.

Anche spillover è una parola con cui abbiamo familiarizzato nostro malgrado, in questi mesi. Letteralmente significa «traboccamento», e indica proprio il salto di specie che avviene quando una malattia passa dagli animali all'uomo. Il coronavirus SARS-CoV-2 ha fatto lo spillover, forse proprio dai pipistrelli. Ma no, come altri che hanno profetizzato l'arrivo di nuovi virus, a cominciare da Bill Gates, David Quammen non è un veggente. È solo un giornalista e scrittore scientifico che ha inseguito per anni sul campo i cacciatori di virus, sempre più preoccupati che l'impatto umano sugli ecosistemi potesse provocare disastrose pandemie.

E che le zoonosi diventeranno più comuni nel corso di questo secolo non è un presagio. È un'amara constatazione di quanto sta già avvenendo. Facciamo un breve ripasso: il virus Hendra, di cui parla Quammen nelle prime pagine del suo libro, è comparso in Australia nel 1994; il virus Nipah, un suo parente, è emerso nel 1998 in Malaysia, contagiando 265 persone e uccidendone 105; del novembre 2002, in Cina, è la comparsa di SARS-CoV, il primo coronavirus a fare danni seri; mentre il secondo, responsabile della Middle-East Respiratory Syndrome, o MERS, è arrivato in Arabia Saudita nel 2012. E ce ne sono molti altri.

Della possibilità di nuovi salti di specie da parte di virus sconosciuti, e di come gli spillover stiano aumentando in misura preoccupante, ci racconta Cristina Da Rold a pagina 26. Ci parla di come la nostra impronta ecologica – con deforestazione, costruzione di strade, sfruttamento del territorio per uso agricolo – ci abbia portato sempre più a contatto con la fauna selvatica in regioni prima inaccessbili del pianeta, e delle specie potenzialmente più pericolose, dai pipistrelli agli uccelli, ai roditori. Massimo Sandal, invece, a pagina 34, passa in rassegna lo stato della ricerca *gain-of-function*, in cui i ricercatori alterano virus esistenti rendendoli più infettivi di quanto siano in natura per studiarne il funzionamento e possibilmente prevenirne le conseguenze o cercare vaccini e terapie. Il vivace dibattito della comunità scientifica a proposito della pericolosità di questi esperimenti è in bilico tra i potenziali benefici di una più approfondita conoscenza di questi nostri invisibili nemici e i rischi che possa verificarsi uno spillover da laboratorio.

Qualcuno si chiederà, forse, perché parliamo di una possibile pandemia del futuro mentre ce n'è già una in corso. Semplice, basta tornare alle prime righe. Perché SARS-CoV-2 non è un virus inaspettato, come avvertivano proprio con uno studio gain-of-function nel 2015 Ralph Baric e colleghi su «Nature Medicine». Né sarebbero inaspettati gli spillover di altri, più aggressivi virus. Ecco perché ne parliamo: per non farci trovare di nuovo impreparati.

A richiesta con «Le Scienze» di giugno, *La formula*, di Albert-László Barabási, un libro sulla scienza delle reti e le dinamiche del successo sociale

Cinque leggi per arrivare primi

Il successo è un sistema complesso. Per arrivare primi non basta il talento, che di certo però aiuta, non è sufficiente un'applicazione costante, al limite del maniacale, nella propria attività, ma è necessario anche saper sviluppare una rete sociale adeguata alla voglia di emergere. Questa formula per ambiziosi è il risultato dell'applicazione della scienza delle reti alle dinamiche del successo in vari ambiti professionali ed ha richiesto anni di lavoro, come racconta Albert-László Barabási, l'autore di questa indagine scientifica, nel libro *La formula* allegato a richiesta con «Le Scienze» di giugno.

Dagli studi di Barabási, direttore del Center for Complex Network Research della Northeastern University di Boston, emergono cinque leggi universali per arrivare al traguardo, qualunque esso sia, prima degli altri, e non riguardano solo la comunità dei ricercatori. Dal tennis alla musica alle giurie che valutano i vini, passando per il mondo degli affari, Barabási, uno dei maggiori esperti mondiali di scienza delle reti, ha analizzato immense basi di dati, ne ha esaminato eventuali regolarità e ha individuato i meccanismi che portano al successo. In altre parole, Barabási e colleghi hanno iniziato a capire le forze universali in azione nei successi e nei fallimenti individuali.

Il libro di Barabási doveva essere allegato al numero di maggio di «Le Scienze», quello che state sfogliando, come annunciato ad aprile. Al suo posto invece questo mese trovate *Manifesto per la rinascita di una nazione*, di Vannevar Bush. Ci è sembrato un testo adatto per il periodo di pandemia che stiamo vivendo, in cui l'importanza della conoscenza che deriva dalla scienza risalta in modo evidente.

Bush era il consigliere scientifico del presidente degli Stati Uniti Franklin Delano Roosevelt durante la seconda guerra mondiale. Verso la fine del conflitto, nel novembre 1944, il presidente chiese a Bush come tradurre l'impegno degli Stati Uniti nella ricerca a scopo bellico in benessere per la nazione in tempo di pace.

La risposta è nel libro che pubblichiamo. Un manifesto sul ruolo centrale della ricerca scientifica che i governi devono sostenere con investimenti se vogliono garantire un futuro ai propri paesi. Una lezione assai utile in tempi di finanziamenti magri per la scienza.

QUADERNI

Gli oggetti più estremi dell'universo

Poco più di un anno fa, il 10 aprile 2019, veniva pubblicata la prima foto di un buco nero, ottenuta da una collaborazione internazionale grazie all'Event Horizon Telescope. Per ricordare questo traguardo epocale, il nuovo titolo della collana *I quaderni de Le Scienze* è dedicato ai buchi neri, dalle prime ipotesi sulla loro possibile esistenza all'immagine che lo scorso anno ha fatto il giro del mondo. Come gli altri quaderni già pubblicati, anche *Buchi neri* è solo digitale – in formato PDF interattivo, scaricabile e stampabile – e raccoglie alcuni dei migliori articoli, italiani e internazionali, pubblicati nell'edizione cartacea e in quella on line della rivista su un tema di attualità scientifica. I quaderni sono disponibili sul nostro sito: https://www.lescienze.it/plus/edicola/collane/quaderni.jsp.

RISERVATO AGLI ABBONATI

Per tutti gli abbonati è on line il sito **www.ilmioabbonamento.gedi.it** dove è possibile acquistare i prodotti in uscita con Le Scienze allo stesso prezzo dell'edicola.
Registrandosi sul sito inoltre è possibile usufruire di sconti sugli abbonamenti del Gruppo GEDI e grandi opportunità anche per l'acquisto di collane.
Rimane sempre attivo il nostro Servizio Clienti al numero 0864.256266 dal lunedì al venerdì dalle 9-18.

iStock; elaborazione Le Scienze

Esperimenti per bambini

Dobbiamo passare più tempo a casa? Magari con dei bambini? Può essere un'occasione da sfruttare per giocare con la scienza grazie a *Esperimenti scientifici*, una mini-collana in due volumi pensata per i ragazzi tra i 7 e i 13 anni di età, ma che non mancherà di incuriosire anche i più grandi. Il primo volume era allegato a richiesta con «Le Scienze» di aprile a 9,90 euro oltre il prezzo di copertina della rivista, il secondo al numero di maggio, allo stesso prezzo del primo.

Ogni volume è composto da 120 pagine con esperimenti da fare a casa, illustrati e spiegati in tavole a colori. I materiali necessari sono semplici e disponibili in ogni famiglia. E così bastano un po' di limoni, per esempio, per produrre corrente elettrica, un po' di carta ed elastici e possiamo costruire un sistema solare da esplorare tra le quattro mura della nostra abitazione.

E ancora, con una bottiglia, dei palloncini e qualche cannuccia possiamo indagare come funziona il sistema respiratorio, e se vi avanza qualche palloncino dall'esperimento precedente, tanto meglio: con cartoncino e tappi di plastica, costruiremo auto che vanno come razzi. Se avere paura di annoiarvi, se volete stare lontani da computer, smartphone, tablet e televisione (soprattutto se volete tenerne lontano i piccoli di casa), e avete voglia di qualcosa di stimolante e intelligente, *Esperimenti scientifici* vi aspetta in edicola.

A RICHIESTA DA APRILE A GIUGNO

Noi e i virus, non sempre nemici

I virus hanno una doppia faccia. Quella probabilmente più conosciuta è la faccia cattiva, di patogeni che possono provocare fastidiosi raffreddori o epidemie disastrose come quelle di AIDS, Ebola o Covid-19, tanto per citare esempi recenti. C'è però anche una faccia buona di questi parassiti composti da niente più che una manciata di proteine, che danno loro una struttura, e acidi nucleici, ovvero DNA o RNA, che custodiscono le informazioni necessarie sia alla replicazione virale sia alla costruzione delle strutture proteiche dei virus.

È una faccia spesso sconosciuta ai più. Per esempio, la placenta è il prodotto evolutivo dell'integrazione di frammenti di genoma virale nel genoma di nostri lontanissimi antenati mammiferi, avvenuta oltre 100 milioni di anni fa. Non sempre dunque il nostro incontro con i virus si traduce in un problema, anzi, spesso c'è reciproca tolleranza e vantaggio. Occorre quindi riconsiderare la nostra relazione con loro, smettendola di applicare categorie morali a fenomeni biologici, come spiega Guido Silvestri in *Uomini e virus*. Il libro di Silvestri, medico, professore ordinario e capo dipartimento alla Emory University di Atlanta, negli Stati Uniti, e uno dei massimi esperti mondiali di HIV, è in edicola dal 18 aprile con «Repubblica» e con «Le Scienze» a 9,90 oltre al prezzo di copertina del quotidiano o della rivista. Resterà in edicola per due mesi.

A colloquio con Pete Worden, direttore esecutivo di Breakthrough Initiatives, un progetto con obiettivi quasi visionari nell'ambito dello spazio

Dalla caccia a ET alla conquista di Alfa Centauri

«Dove sono tutti quanti? ». La leggenda vuole che nel 1950, a Los Alamos, Enrico Fermi pose questa domanda ad alcuni colleghi durante un pranzo, riferendosi all'assenza di prove scientifiche dell'esistenza di vita extraterrestre. Un interrogativo oggi noto proprio come «paradosso di Fermi».

Quasi settant'anni dopo non abbiamo ancora una risposta, ma c'è chi ha deciso di raccogliere di petto la sfida. Stiamo parlando del progetto Breakthrough Initiatives, fondato nel 2015 dal miliardario russo Yuri Milner con obiettivi (e finanziamento) al limite del visionario, dalla caccia alla vita extraterrestre fino alla «conquista» di Alfa Centauri. Il direttore esecutivo è Pete Worden, astrofisico con un passato ai vertici della NASA. L'abbiamo incontrato a Trento, a margine di un evento pubblico organizzato dal Trento Space Center, il nuovo laboratorio di ricerca spaziale dell'ateneo trentino.

Partiamo dalla ricerca di vita extraterrestre. Uno dei vostri progetti è Breakthrough Listen, un programma da 100 milioni di dollari che sfrutta alcuni dei più potenti telescopi al mondo in cerca di eventuali segnali alieni. Ma che tipo di segnali state cercando di preciso?

La cosa più semplice da cercare sono segnali radio non prodotti da fenomeni naturali. La ricerca di questo tipo di segnali è iniziata fin dagli anni sessanta dello scorso secolo, con l'avvio dello storico progetto SETI, ma le caratteristiche delle emissioni radio sono tali che in generale non è semplice riuscire a escluderne con certezza un'origine naturale. Così ci stiamo concentrando anche su altre frequenze, in particolare nell'ottico: se per esempio osservassimo un segnale laser, sarebbe molto più difficile ricondurlo a un fenomeno noto.

Poi c'è un'altra categoria di segnali, che potrebbero essere stati prodotti solo da civiltà molto avanzate.

Di che cosa si tratta?

L'astrofisico russo Nikolai Kardashev, da poco scomparso, aveva suggerito di classificare in tre categorie le civiltà extraterrestri intelligenti, a seconda che siano in grado di sfruttare le risorse energetiche rispettivamente del loro pianeta (come facciamo noi), di una stella o di un'intera galassia.

Una civiltà appartenente alla seconda categoria potrebbe aver costruito una struttura attorno a una stella per raccoglierne l'energia: la presenza di una struttura del genere indurrebbe una variazione di luminosità della stella che, nel caso la si osservasse, apparirebbe molto anomala.

Auscape/Universal Images Group via Getty Images (*telescopio*), cortesia Worden (*Worden, pagina a fronte*)

Qualche anno fa c'è stato un falso allarme in questo senso, giusto?

Sì, è il caso della «stella di Tabby», scoperta nel 2015 dall'astrofisica Tabetha Boyajian con il telescopio spaziale Kepler. La luce di quella stella mostrava variazioni di luminosità fortemente irregolari e difficilmente riconducibili a fenomeni astrofisici noti, tanto che in molti avevano avanzato l'ipotesi che potesse davvero essere la spia della presenza di una struttura artificiale. Successive osservazioni però ci inducono a credere che il fenomeno sia stato prodotto da una semplice interferenza da polveri. Tuttavia il nostro programma di osservazioni punta a indagare anche questo tipo di segnali.

Oltre alla ricerca di segnali extraterrestri, il vostro progetto più ambizio-

di Matteo Serra

CHI È

PETE WORDEN

Astrofisico, è stato professore di astronomia all'Università dell'Arizona ed è considerato uno dei massimi esperti nel settore spaziale in ambito civile e militare. È stato co-investigator di due missioni spaziali della NASA e ha diretto per nove anni, dal 2006 al 2015, il centro di ricerca AMES della NASA.
Ha ricoperto incarichi di vertice nell'aeronautica militare degli Stati Uniti. Nel 1994 ha ricevuto la Outstanding Leadership Medal della NASA.
Dal 2015 è direttore esecutivo di Breakthrough Initiatives e presidente della Breakthrough Prize Foundation, che mette in palio ogni anno premi in denaro per scienziati e gruppi che si siano distinti nella fisica, matematica e scienze della vita.

In cerca di segnali intelligenti. Il radiotelescopio di Parkes, in Australia, uno degli strumenti che collaborano con il progetto Breakthrough Listen.

so è senza dubbio Breakthrough Starshot, che invece riguarda l'esplorazione spaziale. L'obiettivo è addirittura la stella Alfa Centauri, distante più di quattro anni luce da noi. Come pensate di arrivarci?

Con minuscole sonde pesanti appena un grammo, chiamate «StarChip», che viaggeranno a bordo di sottilissime «vele» spinte dalla pressione di luci laser emesse da terra. Grazie alla spinta dei laser, le StarChip potranno accelerare fino a un quinto della velocità della luce, giungendo in tempi relativamente rapidi a destinazione. Una volta arrivate nei pressi di Alfa Centauri, le sonde raccoglieranno da vicino immagini e dati, da inviare poi sulla Terra. L'obiettivo sarà soprattutto l'osservazione ravvicinata del pianeta Proxima b, scoperto di recente, che orbita attorno alla stella Proxima Centauri.

Dal punto di vista tecnologico sembra davvero complesso. Quali sono le sfide più importanti da risolvere?

Sono principalmente tre. La prima è riuscire a realizzare in modo efficace il sistema di laser che dovrà «spingere» le piccole vele: l'idea è unire in un unico fascio centinaia di milioni di piccoli laser, una sfida non semplice. La seconda è lo sviluppo del materiale delle vele, che dovranno essere leggere ed estremamente resistenti. Ma la sfida a mio avviso più complicata è la terza: riuscire a garantire la comunicazione dei dati verso la Terra, che richiederà una «mira» di precisione estrema da parte degli StarChip. Per affrontare queste sfide abbiamo investito 100 milioni di dollari: l'obiettivo è risolverle nei prossimi 5-7 anni e partire poi con la fase operativa.

A proposito di esplorazione spaziale, crede che diventerà presto una necessità per gli esseri umani trovare una casa alternativa alla Terra?

Non la definirei una necessità, ma un «imperativo». In un certo senso il desiderio di espanderci per occupare nuove nicchie disponibili è scritto nel DNA. Lo abbiamo fatto ovunque sul nostro pianeta e il prossimo passo sarà andare fuori dalla Terra. Ci sono già progetti in questo senso: l'imprenditore Elon Musk pensa alla colonizzazione di Marte, il patron di Amazon Jeff Bezos vuole costruire colonie spaziali, e anche Stephen Hawking considerava un imperativo colonizzare un altro mondo.

Succederà, tuttavia non nel modo che immaginano gli appassionati di *Star Trek*, con navi spaziali o cose di questo tipo. Penso invece che sarà più probabile tramite l'invio di dispositivi in grado di avviare la vita in forma biomeccanica e di trasmettere intelligenza.

Un'ultima curiosità: qual è la sua personale soluzione al paradosso di Fermi? Insomma, dove sono tutti quanti?

Credo che la vita sia nata molto prima della Terra e che forme di vita semplici, a livello batterico, siano diffuse ovunque nell'universo. Tuttavia, al tempo stesso penso che lo sviluppo della vita in forme più complesse, fino ad arrivare anche alla vita intelligente, sia un fenomeno raro, e che stia emergendo solo ora, in questa fase dell'evoluzione del cosmo. Non si può escludere che siamo proprio noi la prima forma di vita intelligente della nostra galassia, o addirittura dell'intero universo.

Made in Italy

Grazie all'apprendimento automatico, PatchAi ha sviluppato il primo assistente virtuale empatico da usare in contesti di medicina personalizzata

Vicini ai pazienti con l'intelligenza artificiale

In queste settimane abbiamo imparato ad apprezzare il lavoro del personale sanitario, soprattutto degli infermieri, figure preziose a fianco dei malati. Fondamentali per l'assistenza ai pazienti, ma soprattutto per quel tocco di empatia e umanità che solo chi sta vicino al malato per tanto tempo riesce a sviluppare. È sempre stato così, ma in questo periodo di emergenza sanitaria è apparso chiaro a tutti. E proprio dall'esperienza e dall'ingegno di un infermiere nasce una soluzione digitale che vuole mettere insieme efficienza ed empatia: un assistente virtuale per i pazienti coinvolti negli studi clinici che sappia interagire in maniera intelligente e personalizzata. Lo scenario in cui ci muoviamo non è quello delle emergenze, ma quello delle sperimentazioni su farmaci o dispositivi; l'infermiere di cui parliamo è Alessandro Monterosso, la cui specializzazione è appunto la ricerca.

metamorworks/iStock

Inseguire un sogno

«L'idea è nata quando lavoravo nei reparti di oncologia ed effettuavo studi di ricerca sponsorizzati che testavano l'efficacia di farmaci. Nella maggior parte dei casi, per la raccolta dei dati dei pazienti usavamo strumenti cartacei quando venivano per i controlli, mentre quando erano a casa chiedevamo loro di compilare un diario», spiega l'ex infermiere di ricerca oggi amministratore delegato della *start-up* PatchAi. «Se i pazienti avevano qualche dubbio o volevano informazioni e rassicurazioni, ci raggiungevano con una email o un messaggio su whatsapp, strumenti che non garantiscono fino in fondo la privacy e che non permettono di avere uno storico di quel singolo paziente».

Dalla constatazione di quello che non funzionava e dalla necessità di avere invece informazioni strutturate e quanto più possibile accurate prende il via il ragionamento del giovane infermiere, da sempre appassionato di tecnologia. «Ho unito le mie due passioni. Da una parte sapevo che se avessi abbattuto la barriera informativa raccogliendo meglio i dati relativi alla qualità di vita dei pazienti quando erano lontani dall'ospedale, avrei migliorato la qualità del servizio; dall'altra ho raccolto prove della capacità dei *chatbot* di migliorare la cosiddetta *customer satisfaction*, la soddisfazione del consumatore praticamente in tutti settori», spiega Monterosso. «Per trasportare tutto questo in medicina avevo bisogno di aggiungere l'empatia, perché la relazione terapeutica è basata sul prendersi cura, e questo è davvero specifico del nostro campo. E poi avevo un gran bisogno di capire come si facesse a sviluppare un'azienda». Detto fatto.

Monterosso lascia il suo posto a tempo indeterminato come infermiere e si iscrive al master in International Healthcare Management, Economics and Policy dell'Università Bocconi e si trasferisce da Padova a Milano per inseguire il suo sogno. Ed è fra i banchi del master che conosce le persone con cui fonderà la sua azienda, nata da un'esercitazione in cui gli studenti dovevano simulare lo sviluppo di un'idea di business. Una volta presentato il compito ai professori, i tre – insieme a Monterosso ci sono Kumara Palanivel, medico indiano, e Filip Ivancic, farmacologo serbo – non si sono più fermati e hanno parlato di quella loro idea a molti, raccogliendo sempre commenti entusiasti. Così hanno deciso di fare sul serio e presentarsi a diversi concorsi per start-up vincendone più d'uno: nel 2019, in sei mesi hanno vinto 12 competizioni a livello nazionale e internazionale. A quel punto essere in tre non bastava più: dopo aver portato a bordo un dirigente sanitario con esperienza ventennale, Daniele Farro, PatchAi comincia ad assumere sviluppatori, e a portare dentro la piccola azienda quel *know-how* così importante per la buona riuscita del progetto.

«Siamo stati incubati da Unicredit Start-up Lab e poi dall'Istituto europeo di innovazione e tecnologia, nella sezione Health.

di Letizia Gabaglio

Dispositivo di prima classe. L'assistente virtuale prodotto dagli imprenditori di PatchAi (*sotto, a destra*) garantisce un'esperienza personalizzata nel rapporto con il paziente ed è stato certificato come dispositivo medico di classe I.

LA SCHEDA - PATCHAI

Azienda fondata nel 2018

Persone di riferimento: Alessandro Monterosso (CEO e presidente)

Sito: https://patchai.io/ **Mail:** info@patchai.io

Numero di brevetti: n.d.

Dipendenti-collaboratori: 15

Cortesia PatchAi

Nel 2019, dopo aver chiuso anche un accordo con un'associazione di pazienti per testare il prodotto, abbiamo avuto il nostro primo contratto con una multinazionale, Novartis», spiega Monterosso. «Per loro seguiamo uno studio post-marketing: ogni paziente riceve il nostro assistente con cui può dialogare scegliendo fra personalità diverse quella che più si addice al suo modo di comunicare».

L'assistente, che è stato certificato come dispositivo medico di classe I dal Ministero della salute, ti ricorda quando devi prendere il medicinale e che devi compilare il questionario per riferire come stai: la compilazione avviene automaticamente, rispondendo alle domande che il programma fa, senza bisogno di carta e penna. Non solo, ti permette di registrare la sintomatologia in tempo reale e ti monitora a orario. In questo modo si aumenta la probabilità di avere risposte complete e precise e quindi di poterle usare per lo studio clinico: un dato importante considerando che il 38 per cento dei pazienti ha difficoltà a seguire la routine dello studio e che ben l'85 per cento dei trial non riesce a rispettare le tempistiche stabilite all'inizio proprio per la difficoltà di mettere insieme dati omogenei e tempestivi. La ricerca effettuata dalla start-up, anche in collaborazione con l'Università di Padova, ha permesso di sviluppare questionari «conversazionali» a partire da quelli validati usati per raccogliere i cosiddetti Patient Reported Outcome, la valutazione soggettiva del paziente su alcuni parametri clinici e di qualità di vita.

Il chatbot non parla liberamente ma secondo uno schema predefinito sulla base del tipo di studio e di farmaco in uso, ma i ricercatori che lavorano con PatchAi usano l'apprendimento automatico per permettere al programma di capire quale delle cinque personalità presenti nel sistema è la più adatta come tono di voce e vocaboli al modo in cui si esprime il paziente, così da migliorare l'interazione in maniera empatica.

Oggi la start-up può contare su ingegneri informatici, *data scientists*, scienziati del comportamento ed esperti di interazione uomo-macchina: un insieme di ricercatori che lavora per rendere il chatbot sempre più personalizzato. L'obiettivo è supportare 50.000 pazienti nei prossimi cinque anni e muoversi dall'ambito degli studi clinici a quello dell'assistenza per i malati cronici per migliorarne l'aderenza alle terapie ma anche stimolarne l'attività fisica, le abitudini salutari o fornire supporto psicologico. Un programma ambizioso per l'infermiere virtuale, che nei prossimi mesi avrà una grande opportunità per lanciarsi nel grande business della sanità digitale: PatchAi è l'unica start-up italiana che lavora su trial clinici a essere stata selezionata da Plug and Play Tech Center, la piattaforma di accelerazione della Silicon Valley, per il programma Health Batch X che nei prossimi tre mesi metterà fianco a fianco le start-up con 20 tra le maggiori aziende farmaceutiche, ospedali e centri di ricerca per costruire il maggior numero di progetti possibili.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

La geometria dei virus

Le forme delle strutture che contengono il materiale genetico virale seguono alcune regole geometriche

La pandemia da coronavirus ha reso tristemente popolare l'apparentemente innocua immagine dell'ormai famigerato parassita. O meglio, dell'involucro dentro cui si nasconde la singola elica di RNA del virus. Il filamento ha circa 30.000 nucleotidi, e benché la sua lunghezza sia la maggiore tra quelle dei virus a RNA, è 100.000 volte più piccola di quella del nostro DNA, che supera i tre miliardi di coppie di basi.

Dopo la scoperta della struttura a doppia elica del DNA pubblicata nel 1953, Francis Crick e James Watson si chiesero come potesse un genoma così ridotto contenere l'informazione necessaria per la strategia di riproduzione dei virus, e nell'articolo *Structure of small viruses* del 1956 proposero l'ipotesi della cosiddetta «economicità genetica»: per risparmiare informazione sulla costruzione del proprio involucro, la forma del cosiddetto capside doveva essere il più possibile simmetrica.

Il principio della quasi equivalenza

Supponendo che le proteine di cui è formato il capside fossero organizzate in strutture poligonali, Crick e Watson analizzarono i possibili tipi di punti di contatto tra i vertici e dedussero che la miglior disposizione sarebbe stata quella ottenuta dalla combinazione di tasselli triangolari equilateri. Nel piano i tasselli si possono disporre in una pavimentazione triangolare, che avvolta su sé stessa produce un capside cilindrico. Nello spazio i tasselli si possono invece disporre in forma tetraedrica, ottaedrica o icosaedrica, la più efficiente delle quali è l'ultima: l'icosaedro ha 60 simmetrie, che riducono di 60 volte l'informazione necessaria per la costruzione del capside.

Nel 1962 Aaron Klug e Donald Caspar pubblicarono *Physical principles in the construction of regular viruses*, precisando l'ipotesi dell'economicità genetica nel principio della «quasi equivalenza», secondo cui i virus icosaedrici sono formati di strutture triangolari equilatere che si dispongono negli angoli in maniera «quasi equivalente»: cioè, pentagonale o esagonale. L'idea era venuta loro dall'osservazione delle cupole geodetiche dell'architetto Richard Buckminster Fuller, una delle quali appariva in un'immagine dell'articolo.

Più precisamente, la struttura del capside dei virus icosaedrici è costituita di 180 capsomeri triangolari equilateri, 60 dei quali si dispongono cinque a cinque (a pentagono solido) attorno ai 12 vertici dell'icosaedro, mentre gli altri 120 si dispongono sei a sei (a esagono piatto) su ciascuna delle 20 facce, incontrandosi in 92 vertici. In questo modo il genoma del virus deve solo specificare le regole di formazione dei tasselli triangolari e della loro disposizione reciproca, e può usare il resto dell'informazione per rendere più efficace la strategia di riproduzione e sopravvivenza.

Una teoria più generale

L'ibrida natura biologica dei virus, a metà tra l'inanimato e il vitale, si riflette metaforicamente nell'ibrida natura geometrica dei loro capsidi icosaedrici, che stanno a metà tra l'icosaedro normale (a 12 vertici e 20 facce triangolari) e l'icosaedro troncato (a 12 facce pentagonali e 20 facce esagonali) a forma di pallone da calcio. Il che lascia intravedere la possibilità di virus più complicati, con il capside a forma non di solido platonico, come l'icosaedro, ma archimedeo, come l'icosaedro troncato.

Effettivamente, virus come il papilloma e il polioma costituivano eccezioni alla teoria di Klug e Casper, ma rientrano in una teoria geometrica più generale, pubblicata nel 2019 su «Nature» da Reidun Twarock e Antoni Luque in *Structural puzzles in virology solved with an overarching icosahedral design principle* che usa le piastrelle di Penrose per le pavimentazioni non periodiche del piano come forma dei tasselli, e promette di dare indicazioni utili per lo sviluppo di antivirali che attacchino il virus agendo sulla sua strategia di formazione.

di Elena Castellani

professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Il disaccordo scientifico

Quando gli esperti non vanno d'accordo, come regolarsi?

C'è un tema che oggi sembra particolarmente rilevante, oltre che attuale, anche al di là della comunità dei filosofi: il cosiddetto disaccordo «tra pari» e le implicazioni che ne derivano non solo sul piano sociale e politico ma anche sotto il profilo della teoria della conoscenza. Di fronte a una situazione di disaccordo tra scienziati – quando per esempio esperti virologi sembrano dare pareri discordanti riguardo a COVID-19 e alle misure precauzionali da prendere, o quando esperti del clima sostengono tesi discordanti riguardo all'interpretazione del cambiamento climatico – a chi dare retta e con quale grado di confidenza?

La questione non è certo nuova. Si pensi, per citare esempi illustri, ai seguenti casi storici: il contrasto tra Newton e Cartesio sulla spiegazione dei moti celesti (in base alla forza gravitazionale, per Newton; ricorrendo a moti di vortici nell'etere, per Cartesio); il disaccordo tra coloro che, come Faraday e Maxwell, pensavano che nello studio dei fenomeni elettrici e magnetici ci si dovesse concentrare su che cosa avviene nell'apparente spazio vuoto tra i corpi carichi (introducendo il concetto moderno di campo), e coloro che, come Ampère e Weber, ritenevano invece fondamentale partire dai corpi carichi e studiare le loro interazioni; o, infine, il famoso dibattito tra Einstein e Bohr sulla completezza della meccanica quantistica come teoria fisica.

Questioni generali

Molte di queste controversie sono state superate nel corso del progresso della scienza, per effetto di nuove prove sperimentali o nuove elaborazioni teoriche. E non tutte, ovviamente, hanno avuto implicazioni sulla vita e sull'ambiente come quelle relative alla salute o al clima. Ma, una volta tenuto conto del carattere spesso contingente del disaccordo tra pari e fatte le dovute distinzioni riguardo all'eventuale impatto sociopolitico, si possono comunque porre alcune questioni di carattere generale.

Quali conseguenze epistemiche comporta una situazione di disaccordo scientifico nel momento in cui si verifica? Se gli scienziati non riescono a essere unanimi, per quanto esperti, come fidarsi di quello che dicono? Il disaccordo scientifico genera inevitabilmente un certo scetticismo cognitivo?

Un doppio aspetto

Le risposte non sono ovvie e a riguardo si è sviluppata una certa discussione in ambito filosofico, specialmente nell'ultimo decennio. In particolare, per quanto riguarda l'aspetto epistemico, la riflessione si è concentrata su questioni come, per esempio, che cosa si possa davvero intendere con «pari», e che cosa comporti il disaccordo tra esperti su una determinata assunzione per la credenza nella verità di quest'ultima; in altre parole, sotto quali condizioni sia ragionevole mantenere le proprie credenze se gli esperti non sono unanimi. Dal punto di vista etico, invece, la questione riguarda piuttosto il modo in cui ci si dovrebbe comportare a fronte di una situazione di disaccordo, anche indipendentemente dalle credenze che possiamo avere riguardo alla materia del contendere.

Come accade spesso per temi di riflessione su aspetti scientifici, anche in questo caso non mancano iniziative di carattere interdisciplinare. Vale la pena ricordare, in proposito, il progetto di ricerca When Experts Disagree (http://whenexpertsdisagree.ucd.ie), con sede presso l'Università di Dublino e finanziato dall'Irish Research Council. Il progetto coinvolge scienziati e filosofi, con lo scopo dichiarato di «raggiungere una migliore comprensione del ruolo e delle conseguenze del disaccordo tra esperti della comunità scientifica e delle implicazioni di questo disaccordo per le politiche degli enti governativi e per la formazione dell'opinione pubblica».

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Convivenze arcaiche

Due milioni di anni fa, tre generi di ominidi vissero contemporaneamente nella stessa area del Sudafrica

Me la ricordo bene quella tiepida mattina di luglio di una dozzina di anni fa a Drimolen, in Sudafrica. E mi ricordo bene anche quel piccolo osso: aveva una forma familiare, come di un cappello a tre punte. Me ne resi conto subito, quando il collega che mi era accanto me lo mostrò per condividere una possibile diagnosi paleontologica. Sembrava uno zigomatico umano (l'osso che concorre all'architettura della nostra faccia), ma era enorme, enorme davvero. Pensai e, di getto, dissi: che sia lo zigomatico di un *Paranthropus* (un genere derivato da australopiteco, con i denti enormi, il cranio piccolo sormontato da una tipica cresta ossea e la faccia robusta) ...?! Avevo ragione.

Date sorprendenti

Proprio a Drimolen era stato scoperto in precedenza l'unico cranio femminile pressoché completo di *Paranthropus robustus* (DNH 7), descritto nel 2000 sul «South African Journal of Science». Il sito di Drimolen – nel parco naturale nominato patrimonio dell'umanità UNESCO per le grotte carsiche di interesse paleoantropologico che vi si trovano, fra cui la celebre Sterkfontein – è ora tornato sui mezzi di comunicazione internazionali per un importante articolo comparso su «Science» che porta la firma, fra gli altri, di due italiani: il geologo e antropologo Giovanni Boschian dell'Università di Pisa e il paleoantropologo Jacopo Moggi Cecchi dell'Università di Firenze, co-direttore degli scavi a Drimolen nel periodo in cui mi trovai anch'io lì.

I ricercatori hanno scoperto porzioni significative di un nuovo cranio di *Paranthropus robustus* (DNH 152), ma soprattutto hanno ottenuto solide datazioni del sito, facendo estensivo uso di microstratigrafia, di biocronologia e integrando fra loro vari metodi di datazione: sulle concrezioni, sui fossili e sui sedimenti. Sono date sorprendenti. Le più vecchie si aggirano intorno a due milioni di anni fa e al momento sono le più antiche per un sito con la presenza di questa specie in Sudafrica.

Ma non basta. La scoperta forse più sensazionale è il cranio (incompleto purtroppo, DNH 134) di un «cucciolo» di *Homo*, rinvenuto nei medesimi strati di circa due milioni di anni fa. Inoltre, la datazione di questi nuovi reperti si associa a manufatti del primo Paleolitico (in pietra, ma anche su osso) scoperti proprio a Drimolen, come altrove in Sudafrica e in Africa orientale, e alla presenza nella stessa regione e per analoghe cronologie dei ben noti resti di *Australopithecus* che provengono dal sito di Malapa, distante pochi chilometri, e che sono stati attribuiti ad *Australopithecus sediba*.

Affinità morfologiche

I reperti di Drimolen, unitamente alla loro datazione, mostrano dunque che *Homo, Paranthropus* e *Australopithecus* vivevano contemporaneamente nell'attuale Sudafrica intorno a due milioni di anni fa. Come sottolineano anche gli autori dell'articolo su «Science», questa elevata diversità tassonomica suggerisce una combinazione fra fenomeni di evoluzione endemica e di diffusioni da altre regioni africane durante un periodo di notevole variabilità climatica.

Un dato cruciale è l'affinità morfologica fra il giovane cranio di *Homo* di Drimolen (DNH 134) e il suo quasi coetaneo – in termini di età alla morte, intorno ai tre-quattro anni – scoperto nel 1936 nell'isola di Giava, a Modjokerto. Questo e altri elementi hanno portato i ricercatori di Drimolen alla diagnosi di *H. aff. erectus*. In quella notazione «*aff.*» (ovvero *species affinis*) c'è tutta la prudente provvisorietà della loro diagnosi.

Devo chiudere, ma nei mesi scorsi ci siamo occupati a lungo della specie *H. erectus* e della sua sorella africana, *H. ergaster*. Neanche a farlo apposta, abbiamo inconsapevolmente messo le premesse per inquadrare questo nuovo reperto.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Quarantene spaziali

Anche gli astronauti e le sonde devono fare attenzione ai microrganismi

Prima che l'emergenza legata a Covid-19 ci costringesse a cambiare abitudini, parole come «quarantena» e «isolamento» sembravano evocare soprattutto eventi e situazioni di epoche ormai passate. In realtà, però, c'è un'attività moderna che si confronta abitualmente con la necessità di misure restrittive legate alla possibile contaminazione biologica: l'esplorazione spaziale.

Può sembrare assurdo, ma gli astronauti delle prime missioni Apollo furono sottoposti a una stretta quarantena al loro ritorno dalla Luna. C'era, allora, la possibilità teorica, seppure molto remota, che il nostro satellite ospitasse microrganismi potenzialmente patogeni. Per non correre rischi, Armstrong e compagni furono tenuti in isolamento per oltre due settimane, e anche tutti i campioni lunari vennero trattati come se potessero essere infetti. La procedura fu mantenuta fino alla missione Apollo 14, ma da lì in poi fu abbandonata, dal momento che a quel punto si era capito che la Luna era del tutto sterile.

Prima della partenza

Sebbene una stretta quarantena non sia oggi ritenuta necessaria al ritorno dalle missioni, lo è certamente prima di partire. Pensate a che cosa succederebbe se un membro della Stazione spaziale internazionale dovesse contrarre una malattia infettiva prima di una lunga permanenza, con il rischio non solo per la sua salute ma per quella dei suoi compagni. Un'epidemia a bordo sarebbe, come minimo, piuttosto spiacevole. È noto il caso dell'astronauta Ken Mattingly, che fu escluso dalla missione Apollo 13 per essere stato a contatto con un altro astronauta, Charles Duke, che aveva preso la rosolia da un amico del figlio. Per evitare il ripetersi di casi simili, oggi gli astronauti vengono isolati dal resto del mondo molti giorni prima della partenza. E non c'è dubbio che la comparsa del nuovo virus che provoca Covid-19 causerà, in futuro, una revisione delle misure cautelative.

C'è poi una questione più ampia, che non riguarda i viaggi spaziali con equipaggio umano, ma le missioni spaziali in generale. Negli ultimi decenni, si è capito che organismi terrestri particolarmente resistenti (i cosiddetti estremofili) possono sopravvivere anche a viaggi spaziali molto lunghi. Allo stesso tempo, si è riconosciuto che alcuni ambienti del sistema solare potrebbero avere condizioni che permetterebbero la presenza di vita microscopica, e la sopravvivenza di organismi estremofili terrestri. Ci sono dunque principi di «protezione planetaria» che le agenzie spaziali adottano nelle missioni con sonde automatiche dirette verso altri corpi del sistema solare, per evitare di contaminarli e, quindi, di compromettere i risultati della ricerca di organismi extraterrestri.

Categorie per corpi celesti

A partire dagli anni sessanta, il Comitato per la ricerca spaziale (COSPAR), ha redatto una serie di linee guida e raccomandazioni in questo senso. Le misure consigliate dipendono dal tipo di corpo celeste interessato, in un sistema di classificazione che prevede quattro categorie. La categoria I include corpi come Mercurio o il Sole, che non hanno rilevanza diretta per la ricerca di vita, e che quindi non richiedono particolare protezione. La categoria IV include corpi celesti dove ipoteticamente potrebbe esserci vita extraterrestre, come Marte o Europa: le sonde che scendono su corpi appartenenti a questa categoria dovrebbero essere completamente sterilizzate, per non alterare l'ambiente originale.

Naturalmente, vale anche il discorso opposto. Quando in futuro le sonde spaziali riporteranno sulla Terra materiale prelevato su corpi celesti che, ipoteticamente, potrebbero contenere organismi viventi, i campioni dovranno essere trattati con le dovute cautele.

Di ritorno dalla Luna. L'equipaggio della missione Apollo 11 indossa le tute per l'isolamento biologico al suo arrivo a bordo della portaerei *U.S.S. Hornet* il 24 luglio 1969, nel corso delle operazioni di recupero nell'Oceano Pacifico centrale.

Cortesia Ed Hengeveld (*scansione*)/NASA

AMBIENTE

Un piccolo, grande paradosso

La biomassa vegetale cresce ma gli insetti diminuiscono a causa di attività umane

diliananikolova/iStock

Luci che si spengono. Tra gli insetti che stanno diminuendo ci sono le lucciole. Proprio come altri insetti, anche le lucciole soffrono per perdita di habitat, uso di pesticidi e cambiamento climatico, ma hanno un ulteriore nemico di origine antropica: l'inquinamento luminoso.

L'allarme era stato lanciato nel 2017 dai membri di una società entomologica amatoriale: in tre decenni la biomassa degli insetti delle riserve naturali della Germania era crollata del 75 per cento. Lo scetticismo iniziale è stato presto accantonato e numerosi studi hanno confermato le loro osservazioni: gli animali di maggiore successo del pianeta sono vittime di una moria, causata da abuso di pesticidi e trasformazione del territorio. Uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», e coordinato dall'entomologa Ellen Welti dell'Università dell'Oklahoma, aggiunge nuovi elementi al dibattito, confermando il ruolo del cambiamento climatico. I ricercatori hanno incrociato due serie storiche di dati, una di 16 anni e l'altra di 22, relative a una prateria del Kansas non interessata da attività umane. Le misurazioni includevano biomassa vegetale, composizione elementare dei tessuti delle piante, abbondanza di cavallette e dati climatici. Nel periodo considerato, temperature più calde e l'aumento dell'anidride carbonica in atmosfera hanno raddoppiato la biomassa erbacea. Ma la concentrazione di elementi essenziali – come azoto, fosforo, potassio e sodio – nei tessuti vegetali si è progressivamente ridotta. Nello stesso intervallo di tempo, l'abbondanza delle cavallette è diminuita di oltre il due per cento ogni anno. Sebbene il declino sia in parte associato alla ciclicità di fenomeni climatici come El Niño, gli autori stimano che circa il 25 per cento dipenda da un impoverimento della dieta.

Davide Michielin

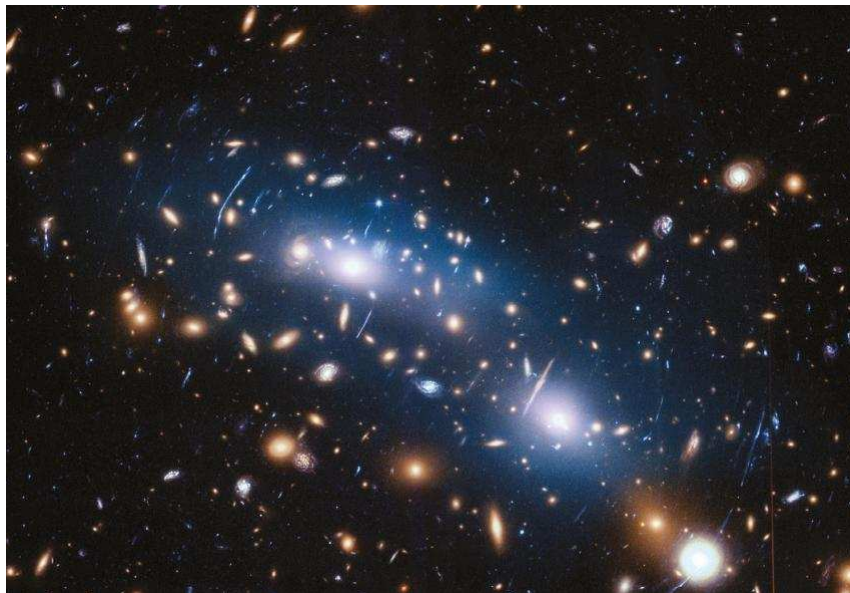
ASTRONOMIA

Luce sulle prime stelle

Rilevate tracce indirette della prima generazione stellare dell'universo

La caccia alle prime stelle dell'universo segna un passo in avanti. Questa volta, a fornire una nuova prova – per quanto indiretta – della loro esistenza è una ricerca effettuata da un gruppo guidato da Eros Vanzella e Massimo Meneghetti, dell'Istituto nazionale di astrofisica di Bologna. Gli autori, che hanno pubblicato il loro studio su «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», si sono avvalsi del Multi Unit Spectroscopic Explorer, il potente spettrografo installato sul Very Large Telescope dell'European Southern Observatory, all'Osservatorio del Paranal, in Cile.

Ad aiutare i ricercatori a individuare le tracce di questa particolare popolazione di stelle (nota come Popolazione III), la più antica conosciuta e ipotizzata, di cui però ancora non si hanno osservazioni dirette, è stato un ammasso di galassie in direzione della costellazione di Eridano, noto come Macs J0416, che ha «amplificato» la luce di una dozzina di stelle lontanissime grazie all'effetto di lente gravitazionale.

In pratica, come descritto dalla teoria generale della relatività di Albert Einstein, l'enorme massa dell'ammasso di galassie, posto fra noi e quelle stelle, ha piegato le traiettorie della radiazione elettromagnetica emessa da quelle stelle lontane, distorcendola ma anche rendendola più luminosa di oltre 40 volte, tanto da renderla visibile ai nostri telescopi.

Secondo gli autori dello studio, l'analisi spettrale di quella radiazione elettromagnetica mostra le caratteristiche tipiche della prima generazione di stelle, composta solo dagli elementi prodotti durante la nucleosintesi primordiale: idrogeno, elio e litio; tutti gli altri elementi infatti sono stati sintetizzati all'interno delle stelle o nelle esplosioni di supernove. Tuttavia, per vederle direttamente dovremo forse attendere l'erede del telescopio spaziale Hubble, ovvero il James Webb Space Telescope, il cui lancio è previsto per il 2021. COVID-19 permettendo.

Emiliano Ricci

Ecco la risonanza elettrica, scoperta «per caso»

La storia della scienza è ricca di casi di «serendipità», in cui scoperte importanti avvengono in modo casuale e a volte fortunoso. Ha però quasi dell'incredibile quello che è accaduto nei laboratori dell'Università del New South Wales di Sydney, dove un gruppo di fisici guidati da Andrea Morello ha realizzato un esperimento di «risonanza elettrica nucleare», che dimostra la possibilità di controllare il nucleo di un singolo atomo usando solo campi elettrici (e non magnetici).
La scoperta – che realizza per la prima volta un'idea avanzata nel 1961 dal fisico olandese Nicolaas Bloembergen – in questo caso non solo è arrivata per caso, ma addirittura in seguito a un piccolo incidente avvenuto in laboratorio.
Morello e colleghi inizialmente avevano l'obiettivo di effettuare un esperimento di risonanza magnetica nucleare su un atomo di antimonio, allo scopo di studiare in particolare il comportamento dello spin nucleare, una proprietà quantistica associata al nucleo atomico. Per farlo, gli scienziati avevano messo a punto un dispositivo dotato di una speciale antenna, necessaria a creare un forte campo magnetico in grado di controllare il nucleo dell'atomo: tuttavia, l'elevata potenza applicata all'antenna ha finito per danneggiarla. Con grande sorpresa dei ricercatori, non solo dopo l'incidente il dispositivo ha continuato a funzionare, ma il nucleo ha cominciato a comportarsi in modo molto strano: solo dopo un po' di tempo Morello e colleghi hanno capito che l'antenna danneggiata stava creando un forte campo elettrico, e che quello che stavano osservando era una risonanza elettrica e non magnetica.
Il risultato, pubblicato su «Nature», è notevole: riuscire a controllare il nucleo di un atomo senza applicare campi magnetici, difficili da confinare in piccoli spazi e che necessitano di un alto dispendio di corrente, rappresenta una svolta sperimentale di grande portata e potrà portare ad applicazioni molto interessanti, in particolare nell'informatica quantistica e nella sensoristica.

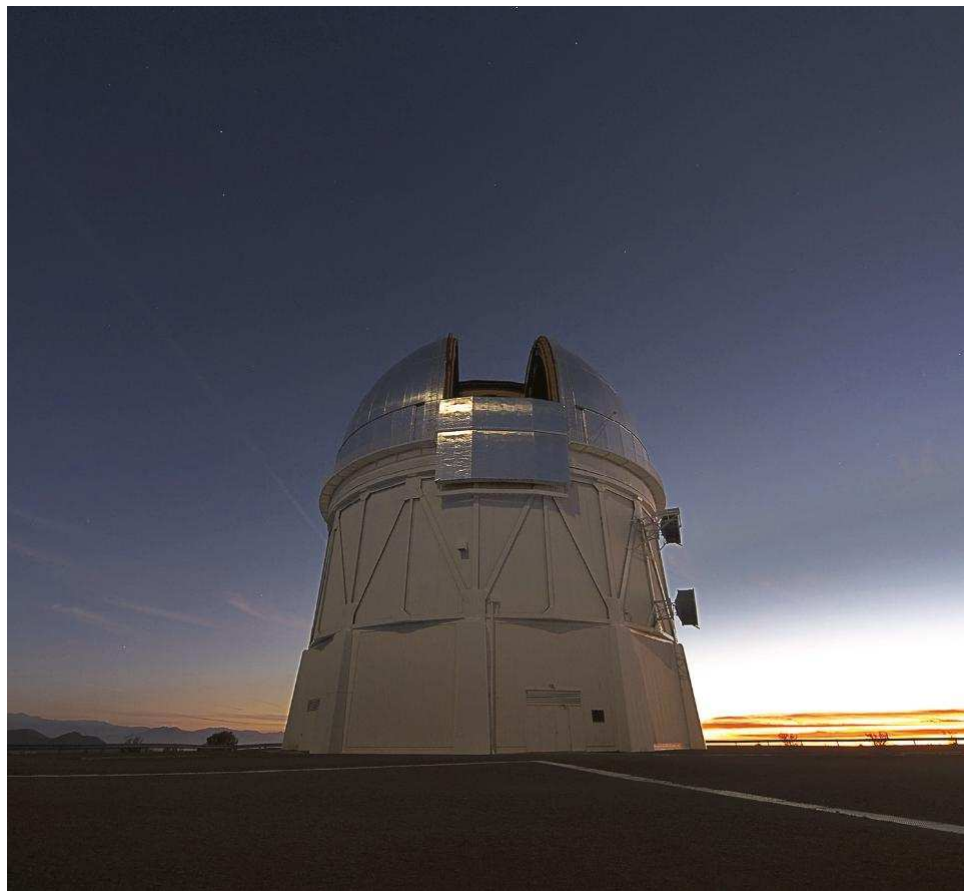
Matteo Serra

Cortesia NASA/ESA/M. Montes, Università del New South Wales

ASTROFISICA

Materia oscura, forse

Indizi su questa elusiva forma di materia da due telescopi

T. Abbott/NOAO/AURA/NSF/SPL/AGF

È ormai ben noto che la materia oscura - l'elusiva forma di materia che costituirebbe circa l'86 per cento della massa dell'intero universo – gioca un ruolo essenziale nella formazione e nella distribuzione delle galassie. Ma resta ancora misteriosa la sua reale natura, cioè il tipo di particelle da cui sarebbe composta. Ora però una ricerca pubblicata su «Physical Review Letters» da una collaborazione internazionale, guidata da Simone Ammazzalorso dell'Università di Torino e Daniel Gruen della Stanford University, offre indizi interessanti sulla validità di alcuni modelli che descrivono la materia oscura.

I ricercatori hanno studiato in particolare le osservazioni del telescopio cileno usato per la campagna Dark Energy Survey (DES) e quelle dell'osservatorio spaziale Fermi Large Area Telescope (LAT). I dati raccolti da DES individuano la posizione delle cosiddette lenti gravitazionali (un effetto relativistico per cui l'immagine di un oggetto distante giunge distorta o moltiplicata agli occhi di un osservatore): questa informazione consente di mappare la distribuzione della materia oscura. Le osservazioni di LAT hanno permesso invece di ricostruire la posizione delle emissioni di raggi gamma, potenti getti energetici che secondo alcuni modelli potrebbero essere emessi proprio in seguito a collisioni tra particelle di materia oscura.

Incrociando i dati, gli astronomi hanno individuato la presenza di una correlazione significativa: il segnale di raggi gamma è apparso più luminoso in corrispondenza delle regioni più ricche di materia oscura, e viceversa. Ma i raggi gamma osservati potrebbero essere stati prodotti da altri fenomeni astrofisici, come per esempio i *blazars* (buchi neri supermassicci molto energetici). Serviranno quindi nuove osservazioni per avere una risposta più chiara.

Matteo Serra

Alle origini del campo geomagnetico primordiale

Il campo magnetico terrestre attuale è generato per effetto dinamo dalla rapida rotazione dello strato esterno del nucleo del nostro pianeta, composto da materiali metallici – ferro e nichel, principalmente – allo stato liquido. È questa rotazione a generare le correnti elettriche da cui origina il campo geomagnetico. Tuttavia,la Terra ha acquisito questa struttura geofisica nel corso del tempo e la dinamo attuale sicuramente non era presente nella Terra primordiale. Eppure, per il nostro pianeta l'esistenza di un antico campo magnetico è evidenziata dai dati paleomagnetici.

Una ricerca, pubblicata su «Nature Communication» ed effettuata dal gruppo guidato da Lars Stixrude, dell'Università della California a Los Angeles, individua nel magma basale, che si trova appena all'esterno del nucleo (e quindi a pressione e temperatura molto elevate), la fonte della dinamo primordiale.

Secondo le simulazioni degli autori della ricerca, i silicati allo stato fuso di cui era composto il magma avevano una conducibilità elettrica sufficiente a generare un effetto dinamo capace di sostenere un campo magnetico compatibile con quello presente sulla Terra nell'Archeano, fra 4 e 2,5 miliardi di anni fa, come testimoniato dai reperti paleomagnetici di quel periodo geologico.

Emiliano Ricci

BIOLOGIA

La longevità è femmina

Dai mammiferi ai pesci, le femmine vivono più dei maschi

Non succede solo a noi umani: le femmine vivono più dei maschi in gran parte dei mammiferi. Jean-François Lemaître, dell'Università di Lione 1, ha ricostruito i tassi di mortalità per età per un centinaio di specie di mammiferi in natura e mostra sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» che nel 60 per cento delle popolazioni esaminate le femmine sono più longeve, in media del 18 per cento (negli esseri umani la differenza è di quasi l'8 per cento). I tassi di invecchiamento però non differiscono tra i sessi; la differenza non dipende quindi da una senescenza più rapida dei maschi, ma dalla loro maggiore mortalità in ogni fascia di età.

Un motivo sembra essere la dotazione di cromosomi sessuali. Lo mostra un altro studio pubblicato su «Biology Letters» da Zoe Xirocostas, dell'Università del New South Wales a Sydney in Australia, che conferma le osservazioni nei mammiferi e le estende a uccelli, rettili, anfibi, pesci, insetti e altri invertebrati. In genere, vive di più il sesso che ha due copie del cromosoma sessuale principale: nei mammiferi le femmine col doppio X, mentre negli uccelli, per esempio, i maschi che hanno due cromosomi Z. Lo studio rafforza un'ipotesi formulata da tempo ma mai verificata a fondo: gli animali con una sola copia del cromosoma sessuale maggiore sarebbero più vulnerabili alle mutazioni nei suoi geni.

Questa però non è l'unica spiegazione, perché le femmine hanno un certo vantaggio a prescindere: quando sono il sesso più longevo, vivono in media il 21 per cento in più dei maschi, mentre nel caso opposto il vantaggio medio dei maschi è solo del sette per cento. Devono quindi essere in gioco anche altri fattori, come il maggior peso sui maschi della selezione sessuale, o il loro stile di vita spesso più rischioso, e forse gli effetti degli ormoni sessuali.

Giovanni Sabato

Alleanze tra batteri diversi per resistere agli antibiotici

L'alleanza tra batteri fa la forza, anche senza scambio di materiale genetico. E complica il trattamento delle infezioni, che è tarato più sul singolo patogeno che sulla variegata comunità di cui fa parte.

Come si legge in uno studio pubblicato su «Science Advances», Jordi García-Ojalvo e Letícia Galera dell'Università «Pompeu Fabra» di Barcellona hanno dimostrato che due specie comuni di batteri mostrano risposte opposte agli antibiotici a seconda della presenza dell'altra specie.

Se cresciuto in colture separate, *Escherichia coli* risultava sensibile a concentrazioni anche modeste di ampicillina, che inattiva le proteine leganti la penicillina (PBP), fondamentali nella stabilità della membrana cellulare.

Al contrario, *Bacillus subtillis* tollerava l'antibiotico.

Tuttavia, se le due specie venivano coltivate insieme, *B. subtilis* riduceva la quantità di ampicillina nel mezzo permettendo a *E. coli* non solo di sopravvivere a concentrazioni più elevate ma perfino di sopraffare il coinquilino.

I ricercatori hanno sviluppato un modello matematico che riproduce i risultati sperimentali, suggerendo che l'alta concentrazione di PBP nella membrana di *E. coli* inneschi una fitta corrispondenza di risposte antibiotiche tra le due specie batteriche.

Davide Michielin

claudio.arnese/iStock

AMBIENTE

Tundre e savane sempre più alberate

La presenza di più piante legnose avrà conseguenze sul clima e sulla fauna

Cambia il clima, cambia il paesaggio. Muoiono i coralli negli oceani sempre più caldi, crescono arbusti e muschi sulle vette himalayane sempre meno fredde. Ma le trasformazioni più radicali riguardano tundre e savane, si scopre su uno studio pubblicato su «Global Ecology and Biogeography», coordinato da Mariana García Criado dell'Università di Edimburgo, che si stanno riempiendo di alberi e arbusti, come hanno osservato i ricercatori analizzando i dati raccolti sulla copertura vegetale di 899 siti.

Dal 1876 al 2016, oltre i due terzi di quei siti hanno visto aumentare la presenza di piante legnose. Mediamente, il tasso di crescita di alberi e arbusti è stato del 3,7 e 6,3 per cento ogni dieci anni in tundre e savane, rispettivamente. Fermandoci agli ultimi cinquant'anni, nella tundra artica di Canada e Stati Uniti settentrionali, Groenlandia, Nord Europa e Russia, la copertura arbustiva è aumentata del 20 per cento, complici temperature più elevate; nelle savane di Africa, Australia e Sud America le piante legnose sono cresciute del 30 per cento soprattutto per precipitazioni più abbondanti.

Il cambio di aspetto di tundre e savane, alterando ciclo del carbonio e temperature, preoccupa per le conseguenze sul clima: le piante legnose catturano carbonio ma alimentano gli incendi e quindi ne favoriscono il rilascio; assorbono parte della radiazione solare altrimenti riflessa nello spazio; rendono il terreno più caldo causando nelle tundre lo scioglimento del permafrost, che immagazzina circa la metà del carbonio presente nel suolo. Anche gli animali ne risentiranno, ma in modo diverso. Per esempio, soffriranno i caribù perché avranno meno licheni e briofite da mangiare, mentre l'alce amplierà il suo areale conquistando terre sempre più a nord.

Martina Saporiti

RuslanKaln/iStock

Elettrificazione dei trasporti e cambiamento climatico futuro

Il sistema dei trasporti è responsabile globalmente di quasi il 25 per cento delle nostre emissioni di gas serra. C'è quindi molto interesse per le possibili misure di riduzione in questo settore. Tra queste, la più drastica e promettente sembra l'elettrificazione del trasporto su strada. I veicoli elettrici aiuteranno a risolvere il problema dei cambiamenti climatici nel prossimo futuro?

Su questo tema sono stati pubblicati diversi articoli, tra cui quello di Runsen Zhang, dell'Università di Hiroshima, e Shinichiro Fujimori, dell'Università di Kyoto, su «Environmental Research Letters», in cui si analizza il potere di riduzione dei trasporti elettrificati insieme ai percorsi socio-economici e di mitigazione a livello globale.

I benefici di avere un «parco macchine» elettrico si vedranno sulla qualità dell'aria (anche se il traffico non è l'unica sorgente di inquinamento), ma più controversi sono i benefici per il clima. Al clima non interessa dove e da che cosa vengano emessi i gas serra, ma quanti ne siano emessi in totale. Elettrificando i trasporti su strada, questi non emetteranno gas serra quasi per nulla; ma l'energia immagazzinata nelle batterie deve essere prodotta altrove, in genere in centrali di produzione energetica.

L'articolo di Zhang e Fujimori mostra allora che, se questa energia fosse prodotta tutta (o quasi) da combustioni fossili, le emissioni totali addirittura aumenterebbero: a causa, per esempio, delle perdite di energia e delle sue conversioni. Bisogna invece che ai mezzi di trasporto elettrici si aggiungano percorsi virtuosi di decarbonizzazione in altri settori.

In realtà, come mostrano altri studi, già oggi in molti paesi la percentuale di energia prodotta con combustioni fossili sta diminuendo, per cui conseguenze negative dell'elettrificazione del trasporto su strada si potrebbero vedere solo in quei paesi, come la Polonia, la cui produzione di energia dipende fortemente dal carbone. Quindi il ruolo della elettrificazione negli sforzi di mitigazione climatica risulterà sicuramente importante nel prossimo futuro.

Antonello Pasini

Esoscheletri a motore per correre ancora più veloci

Nel gergo di chi si occupa di robotica, gli «esoscheletri» sono strutture da indossare che sostengono gli arti nei movimenti. Possono essere passivi, cioè dotati di soluzioni meccaniche come sistemi di cavi e molle, oppure attivi, con motori elettrici.
Quelli per gli arti inferiori trovano impiego soprattutto nella rieducazione post-traumatica o post-ictus, tuttavia, c'è chi pensa di usarli per il divertimento. Come Steven H. Collins della statunitense Stanford University che, insieme a colleghi della Carnegie Mellon University, sempre negli Stati Uniti, e dell'Università di Ghent, in Belgio, hanno cercato di capire quale tipo di esoscheletro sia più efficace nell'assistere i runner.
L'esito dello studio di Collins e colleghi, pubblicato su «Science Robotics», ha rivelato che a dare i risultati migliori non sono gli esoscheletri passivi, come ipotizzavano i ricercatori, ma quelli a motore, più pesanti. Testati su persone che correvano su un tapis roulant, i primi hanno richiesto un consumo di energia superiore dell'11 per cento rispetto alla corsa libera, i secondi inferiore del 15 per cento.
A che cosa potrebbe servire un esoscheletro del genere? Per ridurre gli impatti della corsa sulla colonna ma anche, pensano gli autori dello studio, per permettere di correre a fianco di qualcuno più veloce oppure per muoversi più rapidamente a piedi. (*RiOl*)

La vita marina è in fuga verso i poli

È bastato l'aumento di un grado delle temperature medie degli oceani rispetto ai livelli preindustriali per sconvolgere la distribuzione della vita marina. È quanto emerge da uno studio effettuato da Martin J. Genner, ecologo evolutivo, dell'Università di Bristol e colleghi, pubblicato su «Current Biology».

I ricercatori hanno esaminato le fluttuazioni a livello globale nelle popolazioni di 304 specie marine, che includono plancton, invertebrati, pesci e uccelli. In tutti i gruppi è emersa la stessa tendenza: una crescita sul lato polare del loro areale di distribuzione e un declino su quello equatoriale. Questo significa che le specie marine non riescono ad adattarsi all'aumento di temperatura dell'acqua, che potrebbe raggiungere 1,5 °C entro il 2050.

Serviranno nuovi studi per sapere se la tendenza è dovuta a limiti fisiologici delle specie o a cambiamenti in altri organismi con cui interagiscono. È probabile, però, che l'impatto sulle attività legate alla pesca sarà drammatico. Gli stock ittici (come quelli di merluzzo) potranno aumentare localmente nei mari freddi, mentre le acque tropicali diventeranno sempre meno pescose. Un dato è certo: la perdita di biodiversità marina sarà inevitabile. (*EuMe*)

L'origine della mano nella pinna del pesce fossile

Nuotava in acque basse ma poteva anche rimanere sulla terraferma per brevi intervalli di tempo. È *Elpistostege watsoni*, vissuto circa 380 milioni di anni fa, l'anello evolutivo mancante nella transizione dai pesci agli animali a quattro zampe (tetrapodi), passaggio decisivo per la storia della vita. Il suo scheletro fossile è stato ritrovato nel 2010 a Miguasha, in Canada, da Richard Cloutier della Flinders University di Adelaide, in Australia, e colleghi. Dopo anni di meticolose ricostruzioni, si è scoperto che il reperto, descritto su «Nature», fornisce importanti novità sull'origine e sull'evoluzione della mano umana.
Effettuando TAC sulla pinna pettorale, i ricercatori hanno evidenziato la presenza di omero, radio, ulna, ossa del carpo e falangi terminali organizzate in dita, articolate nella pinna allo stesso modo in cui le dita sono articolate nella mano umana. La struttura complessa serviva a sostenere l'animale, lungo 1,57 metri, e a distribuire il peso in maniera equilibrata, offrendo più piani di flessibilità per i movimenti. Secondo gli autori, «*Elpistostege* non è necessariamente un nostro antenato, ma, tra le forme di vita vissute sulla Terra, è la più vicina a un vero fossile di transizione, un intermediario tra pesci e tetrapodi». (*GiAs*)

Katrina Kenny (*pesce fossile*); hudiemm/iStock (*banco di pesci*)

La crescita lenta del cervello di Lucy

Il cervello di *Australopithecus afarensis* era ancora organizzato come quello delle scimmie antropomorfe, ma cresceva già più lentamente. E la lenta maturazione cerebrale avrebbe prolungato l'infanzia, imponendo lunghe cure parentali ma estendendo il periodo dell'apprendimento. Lo mostra l'analisi di otto crani fossili, due dei quali infantili, pubblicata su «Science Advances» da Philipp Gunz, del Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia.

L'origine della riorganizzazione e della crescita protratta del cervello umano è dibattuta, fra chi le ritiene conseguenza dell'aumento di dimensioni cerebrali nel genere *Homo*, e chi pensa che sia iniziata già negli australopitechi, preludendo alle evoluzioni successive. Le impronte di alcuni tratti cerebrali nei crani degli australopitechi sembravano indicare già una riorganizzazione in senso umano. Ma questi tratti si imprimono male nel cranio, e Gunz, ricostruendo virtualmente i crani danneggiati con tecniche più precise, ha appurato che in realtà quei tratti erano ancora scimmieschi. I due bambini mostrano però che la crescita era già più lenta, «cosa probabilmente essenziale per l'evoluzione della prolungata fase di apprendimento negli ominini». (*GiSa*)

Osservare neutrini con un radar

I neutrini cosmici, prodotti in seguito a violenti eventi astrofisici, sono messaggeri molto preziosi di quello che accade nell'universo. Tuttavia, riuscire a rilevarli è un'impresa assai difficile (e finora abbastanza rara), a causa della scarsa capacità di interazione di queste particelle elementari, prive di carica elettrica e di massa piccolissima. Ma adesso un gruppo di fisici, diretto da Steven Prohira della statunitense Ohio State University, ha proposto su «Physical Review Letters» un metodo innovativo che potrebbe aumentare le probabilità di osservare queste elusive particelle.

Il metodo consiste nel generare un segnale radar (rilevabile) prodotto da una cascata di particelle cariche, a sua volta indotta dall'interazione tra un fascio di particelle ad alta energia e un bersaglio. Prohira e colleghi l'hanno testato con successo usando un fascio di elettroni e sottolineano che sarebbe possibile ottenere lo stesso effetto facendo incidere sul bersaglio un fascio di neutrini altamente energetici. Il vantaggio di questo metodo è che permetterebbe di osservare neutrini che hanno energia compresa tra 10 e 100 milioni di miliardi di elettronvolt, un intervallo di energie fuori dalla portata degli attuali rivelatori. (*MaSe*)

I giorni più brevi del Cretaceo superiore

La durata del giorno terrestre non è costante perché, nel corso del tempo, il nostro pianeta ha rallentato la sua velocità di rotazione. Grazie all'analisi del fossile di un mollusco bivalve attualmente estinto, un gruppo di ricercatori guidato da Niels J. De Winter, della Vrije Universiteit di Bruxelles, in Belgio, ha potuto calcolare che 70 milioni di anni fa, durante il Cretaceo superiore, il giorno durava circa mezz'ora in meno rispetto a oggi.
Il valore di 23 ore e 31 minuti è il risultato dell'osservazione che, all'epoca, un anno comprendeva 372 giorni invece degli attuali 365. Dalla variazione della velocità di rotazione della Terra, gli autori dello studio, pubblicato su «Paleoceanography and Paleoclimatology», hanno anche dedotto che la Luna era in media più vicina alla Terra di circa 1000 chilometri.Per ottenere questo risultato, De Winter e colleghi hanno studiato gli «anelli di accrescimento» della conchiglia di un mollusco della famiglia delle rudiste, applicando una particolare tecnica di analisi spettroscopica. Inoltre, poiché le condizioni climatiche alterano l'accrescimento delle conchiglie, gli scienziati hanno potuto anche stimare le temperature delle acque in cui vivevano questi molluschi, scoprendo che variavano da 30 a 40 gradi Celsius, a seconda delle stagioni. (*EmRi*)

Una pioggia di microplastiche

Anche piccoli gesti possono danneggiare l'ambiente, rivela uno studio su «Scientific Reports». Stappando una bottiglia d'acqua, tagliando un pezzo di nastro adesivo o aprendo una confezione di plastica liberiamo nell'aria circa 0,46-250 microplastiche per centimetro (l'esatta quantità dipende da parametri come densità, spessore o rigidezza del materiale). Lo spiegano gli autori, coordinati da Cheng Fang dell'Università di Newcastle in Australia, che hanno studiato le microplastiche usando una microbilancia a cristalli di quarzo, microscopi elettronici e a infrarossi. Entro il 2060 potrebbero essere da 155 a 265 milioni le tonnellate di plastica nell'ambiente, il 13,2 delle quali rappresentato da microplastiche (frammenti, filamenti, particelle, detriti da 1 nanometro a 5 millimetri). Dovremo rivedere questa stima al rialzo? Di certo dovremo capire meglio gli effetti di questo inquinamento sulla salute degli animali. Nei pesci causa problemi respiratori e riproduttivi, mentre negli esseri umani l'ingestione o l'inalazione di microplastiche può scatenare una risposta immunitaria. (*MaSa*)

Daisy-Daisy/iStock

Il prossimo spillover

Il salto di specie del virus che ha causato la pandemia da Covid-19 non è stato il primo evento del genere e non sarà l'ultimo, per questo è importante prevedere dove potrebbe avvenire il prossimo spillover

di Cristina Da Rold

"Abbiamo violato, e continuiamo a farlo, le ultime grandi foreste e altri ecosistemi intatti del pianeta, distruggendo l'ambiente e le comunità che vi abitavano. [...] Uccidiamo e mangiamo gli animali di questi ambienti. Ci installiamo al posto loro. [...] Esportiamo i nostri animali domestici, che rimpiazzano gli erbivori nativi. Le circostanze ambientali forniscono opportunità per gli *spillover*. L'evoluzione le coglie, esplora le potenzialità e dà gli strumenti per tramutare gli spillover in pandemie.»

A scrivere queste righe è David Quammen in *Spillover*, testo imprescindibile per comprendere le dinamiche che sottendono al nascere e all'evolvere delle pandemie oggi.

Cittadini, mezzi di comunicazione e politici non sono preparati a una grande epidemia, come dimostrano gli eventi recenti. La percezione comune è, o meglio era, che eventi così catastrofici non possano più avvenire. Gli scienziati invece ne sono consapevoli da tempo e monitorano questi fenomeni con diversi mezzi, cercando di «prevedere», per quanto possibile, la prossima «malattia X», come era stata definita nel 2018 dall'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) la prossima grave minaccia infettiva che avremmo dovuto affrontare. Da una parte all'altra del globo gruppi di ricerca continuano ogni giorno a monitorare tramite modelli matematici basati su dati epidemiologici reali dove e quando si potrebbe scatenare il prossimo focolaio. È chiaro alla scienza che la domanda non è se una minaccia siffatta possa manifestarsi, ma quando, come, dove e con quali tempi lo farà di nuovo.

Il dato principale è che le epidemie non sono un fatto anomalo nella nostra storia, anche se sono relativamente rare, se pensiamo a tutti i momenti in cui si intersecano i fattori ambientali e antropici adatti all'avvio del focolaio. Perché gran parte delle situazioni potenzialmente a rischio non esplode? Alla base dell'accensione della miccia c'è un evento singolo, il cosiddetto spillover appunto, il «salto di specie» compiuto da un agente patogeno, cioè quando un virus o un batterio passa per ragioni accidentali, per esempio un contatto diretto, da una specie all'altra generando una zoonosi, cioè una malattia che colpisce la nostra specie e che può trasmettersi da persona a persona. Tutto questo è avvenuto nel 2019 con il virus SARS-CoV-2, che causa la malattia indicata come Covid-19 e che probabilmente è passato da pipistrelli o pangolini a esseri umani, forse sfruttando un altro animale come ospite intermedio in questo salto. Al 13 aprile, secondo le stime dell'OMS, la pandemia da Covid-19 aveva causato oltre 111.600 vittime.

Uomini e salti di specie

Lo spillover non è un evento spontaneo in natura: serve l'azione degli esseri umani, frutto di un'interazione non consona fra noi e la fauna selvatica. «Il problema non è la biodiversità virale, ma il nostro rapporto con la natura, in particolare con la fauna», spiega Danilo Russo, professore associato di ecologia al Dipartimento di

MediaProduction/Getty Images

Trasporto di maiali in un mercato della Cina. Lo stretto contatto tra esseri umani e animali può favorire il passaggio di patogeni da una specie all'altra.

agraria dell'Università degli Studi di Napoli «Federico II» e responsabile della Wildlife Research Unit. «Sempre di più gli esseri umani vivono in promiscuità con la fauna selvatica sia tramite la caccia, specie quella illegale, non regolamentata da norme igieniche, sia con il traffico, la caccia, la macellazione, la vendita e il consumo di molte specie animali tipici di certe regioni del globo, spesso in condizioni igieniche assai precarie che aumentano il rischio di trasmissione di patogeni», dice Russo. Si può pensare che lo si sia sempre fatto. E in effetti è così: nel corso della nostra storia sono stati molti gli spillover generati da un contatto non sicuro con la fauna selvatica. Basti pensare all'HIV, originatosi in Africa da un virus presente nelle scimmie (*si veda il box a p. 30*).

«Questi spillover, però, stanno aumentando in modo esponenziale perché la nostra impronta ecologica ci avvicina sempre di più alla fauna selvatica in aree prima inaccessibili del pianeta, e il commercio, anche per collezionismo, porta questi animali nei centri urbani. La costruzione di strade con un ritmo senza precedenti comporta in molte aree una deforestazione senza seguire criteri di sostenibilità, e al tempo stesso la bonifica e lo sfruttamento massiccio dei territorio per fini agricoli, nonché i viaggi e il commercio ormai globale, ci rendono estremamente sensibili ai patogeni come i coronavirus». A scrivere queste parole in un articolo pubblicato sul «New York Times» nel febbraio 2020 è Peter Daszak, ecologo delle malattie e presidente di EcoHealth Alliance, un'organizzazione non governativa che ha come obiettivo proteggere la salute di persone, animali e ambiente dalle malattie infettive emergenti.

Pipistrelli, uccelli, roditori

Fatto salvo che sono gli esseri umani ad accendere la miccia dello spillover con il loro comportamento, ci sono specie più predisposte di altre a incubare i virus. «I pipistrelli sono certamente fra gli animali con la maggiore diversità virale – continua Russo – ma non dobbiamo dimenticare che lo spillover non dipende solo da questo fattore: può originarsi anche da specie che ospitano meno virus. Dipende da quanto prossimo è il nostro contatto con gli animali. La questione è culturale». Insomma: la specie è un fattore, non l'elemento determinante.

Nel 2017 un articolo pubblicato su «Nature» da Kevin J. Olival e colleghi, tutti di EcoHealth Alliance, ha analizzato il potenziale di pipistrelli, primati e roditori nel trasportare specie virali che potrebbero essere trasmesse all'essere umano, mostrando che i pipistrelli erano, appunto, portatori di un'alta carica virale. Le caratteristiche che rendono i pipistrelli ospiti particolarmente accoglienti sono tre. Innanzitutto questi animali vivono in gruppi molto popolosi e promiscui. È più facile quindi che si trasmettano il virus fra loro facilitando mutazioni genetiche virali fra generazioni. Inoltre va considerato che si spostano su lunghe distanze rispetto ad altre specie animali più localizzate. Infine, le specie di pipistrelli sono moltissime, quasi 1400, ognuna delle quali può interagire diversamente con i virus creando molte varianti, alcune delle quali possono essere molto pericolose per noi.

A livello più dettagliato accade questo: l'attività metabolica legata al volo intenso dei pipistrelli produce specie chimiche assai reattive, chiamate radicali liberi, che tra le altre cose danneggiano il DNA cellulare. Questi frammenti di DNA vengono liberati nell'organismo e, normalmente, scatenerebbero una potente risposta infiammatoria. «Nei pipistrelli, però, questa risposta è mitigata, altrimenti un pipistrello in volo sarebbe soggetto ogni volta a una sorta di tempesta infiammatoria. Questa proprietà ha come conseguenza anche la messa in atto di risposte mitigate alla presenza di virus», spiega Russo.

Nel corso della sua evoluzione, quindi, il pipistrello si è adattato in modo da non ammalarsi pur essendo un forte portatore di carica virale. «Non dobbiamo dimenticare che anche noi esseri umani spesso non ci ammaliamo per il virus in sé – prosegue Russo – ma per la reazione infiammatoria che il nostro corpo mette in atto, per esempio la polmonite nel caso di Covid-19, quando riconosce l'agente patogeno da combattere. È stato osservato che i pipistrelli esprimono questa reazione infiammatoria in modo più controllato, quindi ospitano il virus senza ammalarsi».

In altre parole non è colpa dei pipistrelli, o di altre specie portatrici di carica virale, se avviene uno spillover; soprattutto, nel caso dei pipistrelli non è la loro presenza nelle vicinanze delle nostre case a rappresentare un rischio. Al contrario, sono importantissimi per lo stato di salute di un ecosistema. Molte delle 1400 specie di pipistrelli sono insettivore, garantendo un risparmio enorme in termini di pesticidi e quindi di salute.

Nel 2011 un gruppo di scienziati guidato da Thomas Kunz, dell'Università di Boston, ha calcolato quanto più denaro i coltivatori di cotone in una regione del Texas avrebbero speso per i pesticidi se i pipistrelli non avessero potuto svolgere il loro lavoro quotidiano. In un articolo poi pubblicato su «Science» gli scienziati hanno stimato che i pipistrelli farebbero risparmiare gli agricoltori statunitensi intorno ai 22,9 miliardi di dollari all'anno.

Genetica e spillover

Non sempre lo spillover diventa *outbreak*, epidemia, e questo è testimoniato dal fatto che gli spillover sono molti di più di quelli che vediamo. «Il virus può non saper infettare, può non saperlo fare in maniera sufficientemente efficace, o non sapersi trasmettere tra esseri umani», spiega Stefania Leopardi, veterinaria, ricerca-

Cristina Da Rold è giornalista scientifica *freelance* e *data-journalist*, si occupa di salute ed epidemiologia. Dal 2015 è consulente per la comunicazione per l'Ufficio italiano dell'Organizzazione mondiale della Sanità.

IN BREVE

Le grandi epidemie causate dal passaggio di un patogeno dagli animali agli esseri umani, il cosiddetto spillover, non sono eventi anomali nella storia dell'umanità da almeno 10.000 anni, cioè da quando abbiamo iniziato ad addomesticare gli animali.

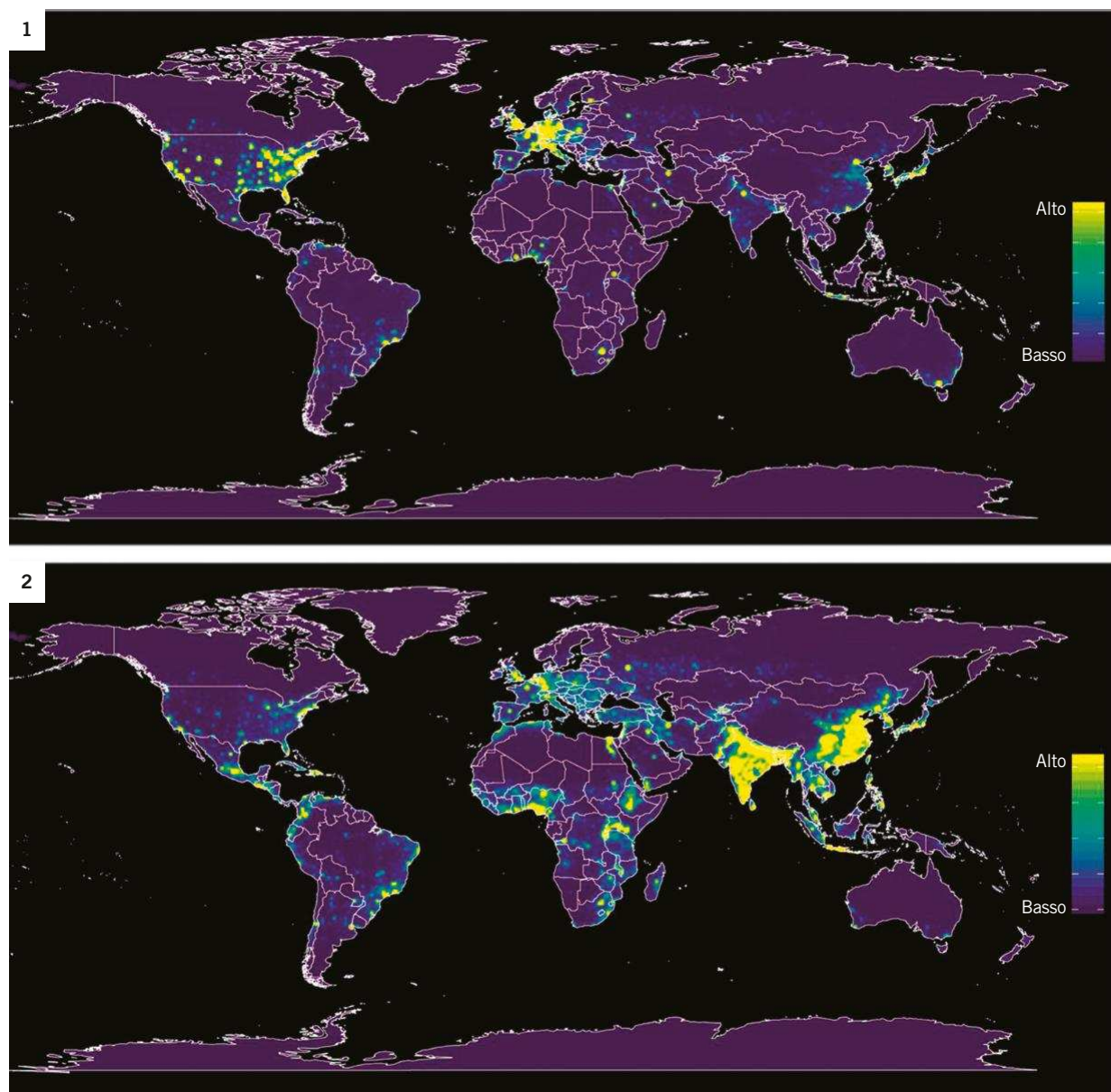
Questi salti di specie, però, ora stanno aumentando di frequenza perché sta aumentando a dismisura la distruzione di habitat e il commercio di fauna selvatica, anche in aree densamente popolate come le città.

Scienziati, enti pubblici e organizzazioni private hanno messo in atto iniziative che mirano a capire dove potrebbero verificarsi i prossimi eventi di spillover e come prevenirli.

Ma per essere efficaci le politiche dei vari paesi basate su queste iniziative dovrebbero essere coordinate a livello internazionale.

Le aree a rischio di salto

Le due mappe rappresentano la distribuzione del rischio relativo previsto di trasmissione di nuovi virus da animali selvatici a esseri umani nel mondo secondo un modello matematico pubblicato nel 2017 su «Nature Communication» da Toph Allen, di EcoHealth Alliance, e colleghi.
La figura 1 indica la probabilità che uno spillover si verifichi e sia riportato tempestivamente. Il colore giallo diventa via via più acceso dove l'attività di monitoraggio e di presa d'atto del problema è migliore e più rapida. Si osserva che le aree dove la probabilità che si verifichino e siano riportati eventi di questo tipo è maggiore in Europa centrale, Italia settentrionale, parte orientale degli Stati Uniti e Giappone.
La figura 2 mostra le aree in cui la probabilità di eventi di spillover è maggiore. La mappa illustra la distribuzione prevista dal modello di nuovi eventi osservati, con un colore più vivace dove il rischio è più elevato. Si evince a colpo d'occhio che il rischio che uno spillover si verifichi è molto elevato nelle aree tropicali: in India, Cina orientale e nel Sudest asiatico, ovvero aree in cui la densità di popolazione è spesso elevata, e ci sono paesi che crescono rapidamente dal punto di vista economico, a spese di habitat naturali, di fatto foreste, che vengono invasi dalla presenza umana. Un'intensa area gialla si trova anche in America centrale e in diverse aree dell'Africa. Ed è proprio nelle zone colorate intensamente di giallo che dovrebbero essere concentrati gli sforzi per prevenire salti di specie dal potenziale pandemico.
La densità di popolazione è un parametro predittore in entrambi i modelli, il reporting non dipende solo dalla densità di popolazione ma anche dalla qualità delle strutture sanitarie, da qui la differenza tra le due mappe.

Da *Global hotspots and correlates of emerging zoonotic diseases*, di Toph Allen, Peter Daszak e altri, in «Nature Communications», Vol. 8, articolo 1124, 24 ottobre 2017 (*mappe*); CC BY 4.0: http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

Il salto remoto dell'HIV

Il virus dell'immunodeficienza umana (HIV) è stato isolato tra il 1983 e il 1984, ma ha una storia molto più lunga di quanto si pensasse e un'origine non umana. Grazie a ricerche genetiche condotte soprattutto nell'ultimo decennio, è diventato chiaro che l'HIV è stato originato da uno spillover fra scimpanzé ed esseri umani, avvenuto molto prima dello scoppio dell'attuale epidemia di AIDS: circa un secolo fa, in Camerun, mentre l'epidemia si originò nell'allora Congo Belga.

Nel 2010, un articolo pubblicato su «Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences» da Paul M. Sharp, dell'Università di Edimburgo, e Beatrice H. Hahn, dell'Università dell'Alabama a Birmingham, ha concluso che i parenti più stretti dell'HIV sono i virus dell'immunodeficienza simiana (SIV) che infettano gli scimpanzé che vivono in natura e i gorilla nell'Africa centro-occidentale. Le analisi della storia genetica dei SIV hanno svelato con maggior dettaglio le origini dell'HIV dagli scimpanzé.

Oggi i SIV sono principalmente virus delle scimmie, e l'infezione sembra non essere patogena. Gli scimpanzé hanno acquisito dalle scimmie due forme di SIV che si sono ricombinate per produrre un virus con una struttura genomica unica. Si stima che dal 1900 lo spillover sia avvenuto più volte fra scimpanzé ed esseri umani, con ogni probabilità tramite il ripetuto contatto dei cacciatori col sangue delle prede. Ancora una volta, una pandemia che ha origine da caccia, macellazione e consumo di fauna selvatica. Eppure ce ne siamo accorti solo molto più tardi, e gli spostamenti da un continente all'altro hanno generato il problema globale che ancora stiamo combattendo.

trice al Laboratorio zoonosi emergenti e riemergenti dell'Istituto zooprofilattico sperimentale delle Venezie a Legnaro, in provincia di Padova. È utile citare tre esempi: rabbia, Ebola e HIV. Nel primo caso il virus si trasmette da animale a essere umano, nel secondo caso è mantenuto in natura dall'animale e genera poi epidemie a seguito di trasmissione interumana; nel terzo il virus è stato trasmesso in origine dall'animale ma è ora adattato all'essere umano e non ha bisogno di ulteriori introduzioni.

La maggior parte dei virus ha a disposizione solo l'RNA per replicarsi, come per esempio SARS-CoV, cioè il virus della SARS, che tra il 2002 e il 2004 ha causato un'epidemia globale, ma che è leggermente diverso dal SARS-CoV-2 che causa Covid-19, o come per esempio i virus dell'influenza ed Ebola. L'elemento cruciale per lo spillover è il rapporto corretto fra proteine specifiche sulla superficie del virus e i recettori sulle cellule dei loro ospiti. Il virus ha strutture proteiche esterne che usa come chiavi per aprire le cellule (animali o umane) ed entrare. «Non sempre però queste chiavi sono adatte per aprire la serratura cellulare umana», continua Leopardi. «Solo in certi casi la chiave è quella corretta e il virus riesce a entrare e quindi inizia a riprodursi con facilità».

Un altro momento cruciale per la diffusione di un virus è che deve sapersi riprodurre all'interno dell'ospite. «Il sistema di riproduzione dei virus è relativamente semplice, perché si basa sul copiare moltissime volte la sequenza genomica per poi far produrre alle cellule dell'ospite le proteine che compongono il virus. Il punto è che talvolta questi processi di replicazione sbagliano – prosegue Leopardi – e per caso alcuni pezzi mutati del genoma si trasformano in una chiave ancora più adatta alla serratura, per un processo di adattamento. In altre parole, il virus è forte proprio perché sbaglia tanto».

I ceppi inoltre possono mutare anche a seconda della persona che li ospita, ragione per cui è importante isolare più campioni virali possibile in caso di epidemia.

Zoonosi antichissime

Nonostante finora abbiamo parlato di ceppi virali presenti negli animali, si stima che meno dello 0,1 per cento di tutti i virus che potrebbero costituire una minaccia per la salute globale si sia riversato dagli animali alla nostra specie. Viene da chiedersi se siano mai esistiti virus umani che non provengano da uno spillover. «La domanda è molto interessante – risponde Leopardi – e al momento possiamo dire che per alcuni virus non sappiamo ancora bene da dove siano partiti».

Sappiamo che la prima grande ondata di zoonosi è avvenuta quando abbiamo iniziato ad addomesticare animali, circa 10.000 anni fa, come è intuibile. E riusciamo a ricavare questa informazione studiando la genetica dei singoli virus, in particolare l'evoluzione del loro genoma nel tempo. «Il metodo che usiamo noi scienziati è l'analisi degli alberi filogenetici, una sorta di albero genealogico dei virus, cioè studiamo che cosa è accaduto quando da un ramo se ne sono generati due, anche se non sempre è così semplice dare risposte certe», spiega Leopardi.

L'approccio One Health

La grande domanda è come intercettare questo rischio prima che si verifichi il problema. La buona notizia è che molti sono i gruppi di ricerca nel mondo che studiano questi fenomeni, coordinati in consorzi e reti intercontinentali, fra cui la già citata EcoHealth Alliance.

Non si tratta solo di genetica. Il punto di partenza è che la salute umana è un evento che origina dall'intersecarsi di molti piani, ecologico, climatico, antropico, ambientale, ed è fortemente connessa con la salute degli animali e degli ecosistemi. A partire da questo assunto, One Health significa lavorare con un approccio collaborativo, multidisciplinare, intersettoriale e coordinato per affrontare i rischi legati ai punti di contatto fra ambiente, ecosistema animale e umano. Gli ambiti in cui si applica questo approccio sono molti: sicurezza alimentare, controllo delle zoonosi, lotta alla resistenza agli antibiotici. «One Health non è un accordo, non è un *framework* o un documento specifico, ma un orizzonte di significato che abbiamo cominciato a riconoscere decenni fa, in Italia già dal 1978 con la riforma sanitaria, e che oggi è la base su cui scienza e politica sanitaria lavorano insieme», spiega Aldo Grasselli, presidente della Federazione veterinari, medici e dirigenti sanitari (FVM) e presidente onorario della Società italiana di medicina veterinaria preventiva (SIMeVeP).

Collaborano in un'ottica One Health le maggiori istituzioni mondiali: Commissione Europea, vari centri per il controllo delle malattie a livello globale, Nazioni Unite, Banca Mondiale, FAO, Organizzazione mondiale della sanità animale, Organizzazione mon-

L'HIV ha avuto origine da un virus analogo presente negli scimpanzé, che ha effettuato un salto di specie circa un secolo fa in Camerun.

Gerard Lacz7AGF

diale della Sanità, fino a tutti i portatori di interesse, governativi o no, che interagiscono nello studio della salute umana. «SARS-CoV-2 che ha generato la pandemia di Covid-19, per esempio, ci deve far assumere un approccio ancora più olistico, considerando il tripode basilare One World-One Health-One Medicine, la dimensione a cui fare riferimento nelle politiche sanitarie di prevenzione primaria. L'impatto su salute, vita ed economia di questa pandemia ha reso evidente il vantaggio di investire in prevenzione per non dover subire traumi globali di portata epocale», afferma Grasselli.

Le iniziative di monitoraggio

Assumere un approccio One Health in questo caso significa che la genetica svolge un ruolo chiave nel monitoraggio dei possibili punti caldi, gli *hot-spot*, da cui potrebbero avere origine spillover, ma significa anche che i modelli predittivi considerano molti altri indicatori.

Nell'ottobre 2017 «Nature Communications» ha pubblicato un lungo articolo che illustrava i risultati di un esteso lavoro di mappatura dei possibili focolai futuri, e che aveva fra le altre cose individuato nella regione dello Hubei, in Cina, dove lo scorso autunno sarebbe partito Covid-19, uno dei punti di rischio di un prossimo spillover. Il modello alla base della mappatura migliora sotto vari aspetti modelli simili precedenti, affermano gli autori dell'articolo, e include nuove serie di dati. Nessuna profezia, ma un'analisi congiunta di molti indicatori ambientali, antropici, genetici e climatici, che concorrono a determinare il rischio della comparsa di zoonosi virali da animali selvatici.

«Abbiamo costruito un modello basato su diverse variabili, come la distribuzione di mammiferi, la copertura della foresta e la deforestazione, la densità della popolazione umana, le occasioni di contatto fra esseri umani e animali selvatici, la variazione del clima, la densità delle aree coltivate e adibite a pascolo, con l'obiettivo di individuare hot-spot di possibile passaggio di nuove zoonosi virali da animali selvatici all'essere umano», racconta Carlo Rondinini, uno degli autori dell'articolo, ricercatore alla «Sapienza» Università di Roma, dove è coordinatore del Global Mammal Assessment.

Dalle mappe pubblicate, (*si veda il box a p. 29*) si evince che la distribuzione globale del rischio di zoonosi, espressa come la presenza di «punti caldi», è concentrata nelle regioni tropicali dove la biodiversità della fauna selvatica è elevata e si verificano cambiamenti nell'uso del suolo. «Riteniamo – affermano gli autori - che queste regioni saranno le più decisive nella messa a punto di programmi di sorveglianza destinati alla fauna selvatica, al bestiame o alle persone, e per l'adozione di programmi di prevenzione di eventuali future pandemie. L'ulteriore affinamento dell'indice di rischio potrebbe anche indirizzare la pianificazione di grandi investimenti per invertire la rotta nell'uso del suolo, riducendo per esempio le concessioni di suolo per il disboscamento e per le attività estrattive, o per la costruzione di dighe o ancora per lo sviluppo di nuove infrastrutture stradali. Tutte attività che comportano un rischio intrinseco di insorgenza di malattie aumentando il contatto umano o zootecnico con la fauna selvatica».

Ogni indicatore riceve a sua volta l'influsso di più fattori concomitanti. Tornando all'esempio dei pipistrelli, i fattori di rischio della trasmissione virale da loro a noi sono legati soprattutto alle regioni tropicali e subtropicali, o comunque alle aree in cui si verificano deforestazione e consumo di carne selvatica.

Dalla mappatura alla prevenzione?

Anche davanti a previsioni dettagliate e frutto di una modellistica solida, a livello operativo non è così semplice agire con prontezza e precisione per fare prevenzione. Non è chiaro su che basi connettere queste previsioni dei modelli con le politiche di gestione dei sistemi di prevenzione, che sono nazionali, e in molti aspetti regionali e locali.

Al momento, per esempio, una variabile che manca, ma che sarebbe molto significativa, è quella sul consumo di animali selvatici, che in alcune aree del mondo è culturalmente molto frequente. «Il meccanismo del contatto non è facilmente prevedibile né modellizzabile perché potrebbe cambiare localmente», continua Rondinini. «Per esempio potrebbe avvenire in mercati con animali vivi in aree urbane o direttamente dall'animale selvatico al cacciatore in aree rurali. Quindi aumentare la risoluzione spaziale di questi modelli è una sfida di difficile soluzione. Tuttavia questi modelli, seppure imperfetti, danno già indicazioni operative che non dovrebbero essere ignorate».

Centrale per la mappatura spaziale è, come si diceva, l'analisi dell'evoluzione genetica dei virus, e in questo senso è importante citare il Global Virome Project (GVP), una collaborazione internazionale nata per rilevare la maggior parte delle minacce virali sconosciute del nostro pianeta. La sfida di fondo del GVP è passare da essere «reattivi» di fronte a una minaccia epidemica, agendo di conseguenza per arginarne contorni ed effetti, a essere «proat-

tivi», preparandosi cioè prima che si verifichi il primo vero spillover e il primo focolaio. «Per essere pienamente preparati dobbiamo conoscere il nemico prima che emerga», dichiara il GVP.

L'obiettivo del GVP è costruire una rete di sorveglianza globale e stabilire un quadro legale, regolamentare ed etico per la condivisione di campioni, dati, informazioni, in modo da mettere a punto un atlante virale globalmente accessibile, una banca dati ecologica e genetica completa di praticamente tutti i virus presenti in natura. Con questa immensa banca dati, il GVP mira a identificare comportamenti e pratiche che possono dare origine a uno spillover, permettendo di prendere misure di mitigazione del rischio.

La fattibilità del GVP è stata validata tramite il programma PREDICT di USAID, l'agenzia degli Stati Uniti per lo sviluppo internazionale. PREDICT è stato il primo progetto ad aver permesso la sorveglianza globale di agenti patogeni che possono diffondersi dagli animali alle persone, sviluppando capacità per rilevare e scoprire virus con potenziale pandemico. Questo programma di ricerca in ambito virologico opera da un decennio in oltre 30 paesi e ha scoperto centinaia di virus, stimando l'esistenza di oltre 1,6 milioni di specie virali sconosciute nelle popolazioni di mammiferi e uccelli. Di questi, circa 700.000 specie avrebbero il potenziale di entrare in contatto con l'essere umano infettandolo e innescando una zoonosi.

Quale strategia scegliere?

«Dal punto di vista operativo sono due gli approcci possibili», prosegue Leopardi. «Da una parte possiamo puntare tutto su progetti come il Global Virome Project per estrapolare obiettivi sulle specie più a rischio, sullo stato reale dell'acqua e setacciare tutto il pianeta dal profondo degli abissi fino alle cime delle montagne per trovare tutti i virus e studiare come interagiscono con i recettori umani per capire i più pericolosi, oppure possiamo investire sulla sorveglianza attiva», C'è infatti anche chi non è d'accordo con l'approccio che prevede di puntare tutto su iniziative come il GVP, perché ritiene che sia come cercare un ago in un pagliaio enorme, dal momento che l'effettivo spillover avviene per caso, al di là del fatto che noi dipingiamo scenari più o meno a rischio. «Questi ultimi propongono invece di investire tutto sulla sorveglianza sull'azione umana per migliorare la rilevazione precoce degli spillover», spiega Leopardi.

Si tratterebbe di iniziare a studiare attentamente la zoonosi non appena si verifica, capendo subito che anche il più piccolo fenomeno può diventare di portata mondiale, come ha dimostrato Covid-19. In quest'ultimo caso comunque, sebbene il virus sia stato isolato dopo dieci giorni da quando il focolaio fu dichiarato, non è bastato per non originare un'epidemia, anche perché il virus è stato riportato dalle autorità con qualche ritardo rispetto a quando è stato scoperto.

«In entrambi i casi una questione complessa rimane tale: come si quantificano le azioni necessarie per la prevenzione in ogni singolo caso, dato che non è l'ambiente ma il comportamento umano a originare uno spillover?», conclude Leopardi.

Un'iniziativa centrale in questa direzione è la già citata EcoHealth Alliance. Lavorando negli Stati Uniti e in oltre 30 paesi, gli sforzi di EcoHealth Alliance si concentrano in cinque direzioni: biosorveglianza, deforestazione, conservazione della fauna selvatica, prevenzione pandemica e approccio One Health. Riguardo all'individuazione di hot-spot pandemici emergenti, EcoHealth Alliance sta lavorando per scoprire le malattie emergenti sfruttando una mappa predittiva unica nel suo genere.

Interessante nell'ambito dei monitoraggi sotto l'ombrello di One Health è anche il lavoro della Global Viral Forecasting Initiative, dal 2019 confluita in una *start-up* chiamata Metabiota, che offre una mappatura in tempo reale e dettagliata di più di 120 patogeni, includendo un profilo sul virus o sul batterio in questione, la storia della sua diffusione e proponendo all'utente grafici e dati. Metabiota collabora con governi, agenzie sanitarie, istituzioni accademiche e imprese private in quasi tutti i continenti. Secondo la start-up, i modelli di Metabiota rappresentano il più grande catalogo di malattie infettive, per oltre 20 milioni di simulazioni, catturando eventi sia ad alta sia a bassa probabilità.

Iniziative sovranazionali

Durante l'Assemblea mondiale della Sanità, nel 2016, l'Organizzazione mondiale della Sanità ha avviato un progetto di ricerca e sviluppo per prevenire le epidemie elaborando modelli di finanziamento e coordinamento per essere pronti alla prossima epidemia e con la messa a punto di un elenco prioritario di agenti patogeni che più minacciano la salute globale e per i quali non erano in preparazione vaccini o farmaci.

Un'altra iniziativa importante è la Coalition for Epidemic Preparedness Innovations (CEPI) lanciata nel 2017 al World Economic Forum di Davos, in Svizzera. CEPI è una fondazione globale che riceve donazioni da organizzazioni pubbliche, private, filantropiche e dalla società civile, che poi investe in progetti indipendenti per accelerare lo sviluppo di vaccini specifici contro nuove malattie infettive. Gli investimenti di CEPI sono centrati su alcuni dei «patogeni prioritari» per l'Organizzazione mondiale della Sanità, che includono: MERS-CoV (e in seguito Covid-19), virus della febbre di Lassa, virus della febbre della Rift Valley , virus Nipah, Chikungunya, febbre emorragica Congo-Crimea e la già citata Malattia X. Al momento l'OMS considera prioritari anche SARS, febbre emorragica Congo-Crimea, virus Ebola, virus Marburg.

Si stima l'esistenza di oltre 1,6 milioni di specie virali sconosciute in mammiferi e uccelli, di cui 700.000 avrebbero il potenziale per innescare una zoonosi

In Europa anche il Centro europeo per la prevenzione e il controllo delle malattie (ECDC) lavora nell'ambito della sorveglianza epidemiologica con uno sguardo One Health. A fine anno l'ECDC, insieme all'Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA), pubblica i risultati delle attività di monitoraggio delle zoonosi nei paesi europei. L'ultimo rapporto è stato pubblicato nel dicembre 2019 e comprende analisi condotte nel 2018 in 36 paesi europei: la prima e la seconda zoonosi negli esseri umani sono state rispettivamente campylobatteriosi e salmonellosi, ed è stato rilevato un grande incremento di infezioni umane da West Nile virus, il cui serbatoio naturale sono gli uccelli selvatici, per un totale di 1548 casi, di cui il 39 per cento in Italia.

In Italia One Health ha radici ben consolidate. «La buona notizia è che il nostro paese ha messo in piedi da quarant'anni un sistema sanitario strutturato nell'ottica di One Health, e in questo siamo stati degli apripista», spiega Grasselli. Già nel 1978 con la legge

Questo macellaio di un mercato della provincia dello Yunnan, in Cina, arrostisce un pollo prelevato da una delle gabbie che si trovano nel suo negozio, tutte piene di animali vivi destinati al commercio di carni. La macellazione sul posto è una pratica molto diffusa nei mercati cinesi.

Tanes Ngamsom/iStock

di riforma sanitaria che ha istituito il Servizio sanitario nazionale sono stati creati i Presidi multizonali di prevenzione, gli Uffici di igiene e medicina veterinaria.

In Italia siamo i primi al mondo ad aver istituito nel 1992 il Dipartimento di prevenzione, obbligatorio per legge all'interno di ogni Azienda sanitaria locale, che prevede diversi servizi integrati che si occupano di salute umana e animale, tra cui igiene e sanità pubblica, sanità animale, igiene degli allevamenti e delle produzioni zootecniche. Inoltre in Italia ci sono i dieci istituti zooprofilattici sperimentali, che rappresentano un altro fondamentale presidio di One Health. Va detto poi che l'Organizzazione mondiale della sanità animale vide la luce nel 1924, ben prima dell'Organizzazione mondiale della Sanità, nel 1948, per affrontare il problema della salute animale a livello globale, considerando l'impatto che le malattie animali hanno su salute umana, disponibilità di derrate alimentari e condizioni di vita delle popolazioni più disagiate del pianeta che trovano nella pastorizia una delle poche fonti di sostentamento.

L'attenzione verso lo stato di salute del mondo animale è importante per avvertire quei mutamenti che ci devono mettere in allarme. «Le api, per esempio, sono un indicatore importante delle condizioni di salute dell'ambiente», spiega Grasselli. «Il latte delle pecore ha rivelato presenza di inquinanti in molti siti in molte regioni del paese, sono altresì estremamente utili le informazioni che ci mette a disposizione lo studio dello stato di salute degli animali selvatici, in particolare di quelli migratori che ci informano di situazioni anche molto lontane».

Il tema principale rimane l'organizzazione delle politiche a livello internazionale, facendo in modo che gli sforzi dei paesi siano coordinati. «Anche sequenziando i genomi di tutti i virus del mondo e cercando di realizzare vaccini per ciascuno, senza un'unica strategia di sorveglianza, senza azioni di prevenzione e sanità pubblica coordinate da una catena di comando univoca a livello planetario non andremmo lontano», spiega Grasselli. Le politiche di One Health devono essere sovranazionali e intercontinentali, per mettere a fuoco la tutela del patrimonio zootecnico anche nelle aree più povere del pianeta, dove è a più alto rischio, secondo il presidente della FVM. «Un rischio che purtroppo nelle malattie infettive non si arresta alle frontiere e può assumere forme ed effetti collaterali molto diversi. Basti pensare agli scenari di migrazione delle popolazioni africane da aree dove per ragioni sanitarie non è più possibile allevare specie di piccoli ruminanti fondamentali per la sussistenza alimentare dei villaggi. Proteggere gli animali dalle loro patologie infettive è fondamentale, è la prima barriera per proteggere gli esseri umani dalle zoonosi e dalle crisi sociali», conclude.

L'idea di fondo che anima le ricerche sul tema degli spillover è dunque che le connessioni fra sistemi sono molto più strette di quanto possiamo intuire, e che studiare la genetica dei virus permette di illuminare questi percorsi tramite cui si originano le zoonosi. La pandemia di Covid-19 ci sta mostrando che resta però ancora da capire come diventare proattivi in poco tempo, per reagire alla minaccia prima che diventi un problema di tenuta delle infrastrutture sanitarie. ■

PER APPROFONDIRE

Global Hotspots and Correlates of Emerging Zoonotic Diseases. Allen T., Daszak P. e altri, in «Nature Communications», Vol. 8, articolo 1124, 24 ottobre 2017.

Host and Viral Traits Predict Zoonotic Spillover from Mammals. Olival K.J., Daszak P. e altri, in «Nature», Vol. 546, n. 7660, pp. 646-650, 21 giugno 2017.

The Evolution of HIV-1 and the Origin of AIDS. Sharp P.M. e Hahn B.H., in «Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences», Vol. 365, n. 1552, pp. 2487-2494, 27 agosto 2010.

Spillover. Quammen D., Adelphi, Milano, 2014.

Virus in laboratorio tra rischi e benefici

Oliver Bunic/Bloomberg/Getty Images

POLITICA DELLA RICERCA

Lo studio di virus pericolosi è importante per sconfiggere questi patogeni, ma il pericolo di fughe accidentali, pur piccolo, è dibattuto nella comunità scientifica

di Massimo Sandal

Un Jurassic Park in provetta. Un ente biologico di un tempo remoto, più piccolo ma più terribile di un qualsiasi tirannosauro, ricostruito dalla biotecnologia, da genomi sepolti in resti di autopsie sotto formalina o in cadaveri congelati nel permafrost dell'Alaska. Non è un film. Nel 2005 i laboratori dei Centers for Disease Control and Protection di Atlanta, negli Stati Uniti, hanno ricreato così il virus dell'influenza «Spagnola», scomparso da un secolo. Tra il 1918 e il 1920 la «Spagnola» causò la più mortale pandemia del XX secolo: almeno 50 milioni di morti, 20 milioni in più di quelli che ha fatto l'HIV in tutta la sua storia. In laboratorio, il virus è stato all'altezza della sua fama. Terrence Tumpey, primo autore dell'esperimento, ha dichiarato a Nature: «Non mi aspettavo fosse così letale».

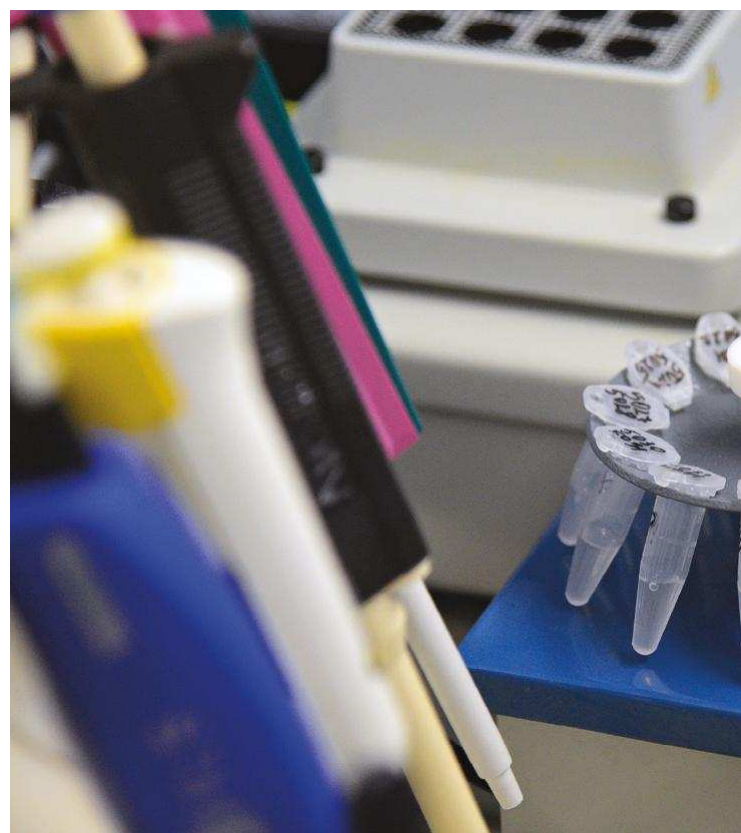
Coltivato in cellule polmonari umane, dopo un solo giorno il virus della «Spagnola» aveva sviluppato 50 volte più particelle virali rispetto a un'influenza normale. E se un'influenza normale non uccide i topi, nell'esperimento di Tumpey era morto il 100 per cento dei topi infetti: nei loro polmoni c'era quasi 40.000 volte più virus rispetto ai valori attesi.

Esperimenti folli, degni di un film di James Bond? Il banale *cliché* degli scienziati pazzi o incoscienti che fanno sfuggire virus e causano catastrofi lo conosciamo tutti. Di recente sono rimbalzate sui mezzi di comunicazione e perfino rilanciate da alcuni politici teorie secondo cui il coronavirus SARS-CoV-2 sarebbe il prodotto artificiale di qualche ricerca nei laboratori cinesi. Non è questo il caso: tutti i dati indicano che l'attuale pandemia è perfettamente naturale, *spillover* del virus da una «specie serbatoio», come i pipistrelli o i pangolini, all'essere umano. Sarebbe però sbagliato ridurre tutto al complottismo. Da anni gli scienziati dibattono su come regolamentare gli esperimenti su virus capaci di scatenare pandemie. Non è impossibile che la prossima pandemia esca da un laboratorio. Eppure questi esperimenti potrebbero essere armi fondamentali contro i virus. Quanto vale questo rischio? Dobbiamo cedere al panico e chiudere tutto, ora che l'umanità sta passando il guado profondo della pandemia di Covid-19? O lasciare carta bianca agli scienziati? La realtà, come sempre, è più complessa di un film catastrofico con gli scienziati cattivi.

Massimo Sandal è stato ricercatore in biologia e ora scrive di scienza come freelance. Suoi articoli sono apparsi su «Le Scienze», «Wired», «Il Tascabile» e altre testate. Ha pubblicato il libro *La malinconia del mammut* (il Saggiatore, 2019).

Creare per comprendere

La ricostruzione dell'influenza «Spagnola» non è stata la prima né l'ultima. Già nel 2002 Jeronimo Cello, Aniko V. Paul ed Eckard Wimmer, della State University of New York, hanno sintetizzato in provetta il virus della poliomielite sfruttando solo la sequenza genetica disponibile *on line* e tecnologie biochimiche commerciali. Con un procedimento simile, nel 2018 Ryan S. Noyce e David H. Evans, dell'Università dell'Alberta, in Canada, e Seth Lederman, della Tonix Pharmaceuticals di New York, hanno sintetizzato il virus del vaiolo equino. Praticamente la stessa ricetta si può usare per ricostruire il vaiolo umano, eliminato dalla faccia della Terra dal 1980. Un'impresa che ora si stima richieda solo un laboratorio adeguato, sei mesi di tempo e una spesa di 100.000 dollari.

Un altro gruppo di esperimenti altera virus esistenti, rendendoli più infettivi di quanto non siano in natura. Si chiamano esperimenti *gain-of-function*, «guadagno di funzione». Nel 2011 due gruppi indipendenti, il primo guidato da Ron Fouchier, dell'Erasmus University Medical Center di Rotterdam, il secondo da Yoshihiro Kawaoka, dell'Università del Wisconsin a Madison, hanno prodotto un virus dell'influenza aviaria H5N1 capace di trasmettersi per via aerea. H5N1 è estremamente pericoloso: su 861 casi noti a febbraio 2020, ben 455, oltre la metà, hanno portato alla morte, e anche le stime ottimistiche della letalità reale (il rapporto tra malati deceduti e malati totali in un ragionevole intervallo di tempo) oscillano tra il 14 e il 33 per cento.

Per fortuna il virus naturale non si trasmette per via aerea, quindi non si propaga. Un virus H5N1 capace di trasmissione aerea, come le influenze stagionali o SARS-CoV-2, renderebbe insignificanti al confronto le catastrofi di Covid-19 o dell'influenza «Spagnola». Lo stesso Fouchier ha ammesso, come riportato da «Science», che si tratta «probabilmente di uno dei virus più pericolosi che si possano costruire». Nel 2014 un esperimento simile è stato ripetuto con il virus influenzale aviario H7N1 dal gruppo di Daniel R. Perez, dell'Università della Georgia. Secondo Simon Wain-Hobson, dell'Institut Pasteur di Parigi, il virus prodotto sarebbe potuto essere, se fosse sfuggito al controllo, 30 volte più letale dell'influenza «Spagnola».

A che scopo giocare col fuoco così? Il fisico Richard Feynman disse: «ciò che non posso creare, non posso neanche comprenderlo». Ricostruire patogeni in laboratorio serve per capirne il funzio-

IN BREVE

Lo studio dei virus in laboratorio serve per capirne il funzionamento e quindi per sorvegliarli, cercando di prevenire future pandemie, o per combatterli, per esempio sviluppando farmaci e vaccini.

Tutto questo implica a volte esperimenti rischiosi. Per esempio ricostruire virus ormai estinti e noti per la loro pericolosità, o rendere artificialmente un virus più letale, o capace di diffondersi per via aerea.

Il rapporto tra costi e benefici di esperimenti del genere è difficile da calcolare, anche perché non mancano incidenti in cui ricercatori si infettano con virus studiati in laboratorio e fughe accidentali.

Finora il dibattito su questo argomento si è sviluppato solo in seguito a incidenti del genere, tra scienziati e a livello nazionale. Sarebbe necessaria invece una discussione pubblica internazionale.

Igor Onuchin/Getty Images

Pronta per il test. Una provetta con materiale biologico umano in un laboratorio di Krasnodar, nella Federazione russa, è pronta per essere sottoposta al test che cerca tracce dell'infezione da SARS-CoV-2, il coronavirus che causa la malattia Covid-19.

namento, e quindi per prevenirli o combatterli. Alteriamo l'infettività dei virus almeno dal XIX secolo: nel 1885 Louis Pasteur generò un ceppo del virus della rabbia che, nel coniglio, riduceva il suo periodo di incubazione da oltre due settimane a circa otto giorni. Il virus alterato era però meno pericoloso: lo scopo di Pasteur, del resto, era proprio ottenere un virus attenuato per la vaccinazione.

Allo stesso modo, oggi modulare l'infettività del virus è spesso un passaggio intermedio per ottenere migliori modelli sperimentali per vaccini e terapie. Regolamentare eccessivamente gli esperimenti può voler dire, secondo alcuni ricercatori, ridurre o rallentare la disponibilità di vaccini. Nel caso della pandemia da H1N1 del 2009 è stato stimato che ogni settimana di anticipo nell'acquisizione del vaccino avrebbe potuto prevenire 300.000-430.000 casi (sia pure su un totale di 60,8 milioni di casi stimati) solo negli Stati Uniti. Inoltre, conoscere dove agiscono le mutazioni più pericolose può permetterci per esempio di individuare bersagli per la progettazione di farmaci. Ogni mutazione del genoma virale determina una modifica delle proteine del virus: le molecole con cui si aggancia alle cellule e si riproduce. Conoscere i punti chiave di queste proteine significa sapere dove far agire un farmaco che possa bloccarle. Far evolvere artificialmente virus resistenti può essere essenziale per decidere se un farmaco possa essere testato o meno: se un farmaco induce rapidamente resistenza in laboratorio, probabilmente è un farmaco da evitare.

Secondo un articolo pubblicato su «Future Medicine» nel 2018 da Ralph Baric, virologo ed epidemiologo dell'Università del North Carolina a Chapel Hill, valutare farmaci antivirali contro i coronavirus, specialmente quelli emergenti, è praticamente impossibile senza costruire ceppi virali altamente infettivi che permettano di studiarne rapidamente l'effetto nei modelli animali da un lato e senza avere ceppi capaci di crescere in cellule umane dall'altro.

Il dilemma tra costi e benefici

Uno degli obiettivi ultimi della virologia è poter prevedere la pericolosità di un virus dalla sola sequenza genetica per contenere o addirittura prevenire il prossimo spillover. Per esempio monitorando i virus negli animali che fungono da serbatoio, come i pipistrelli, e cercando di eliminare quelli potenzialmente pericolosi prima che giungano agli esseri umani. A questo scopo, secondo Fouchier, «gli esperimenti di gain-of-function sono necessari per dimostrare la relazione tra geni e loro mutazioni e le caratteristiche biologiche di un patogeno, e non ci sono approcci alternativi che diano evidenze scientifiche altrettanto incontrovertibili». Ricostruendo il virus dell'influenza del 1918 abbiamo scoperto che non sono le singole mutazioni, ma è la loro combinazione che ha reso quel virus così letale, e potremmo stare in allerta per una combinazione simile di fattori in un futuro ceppo influenzale.

Stiamo già iniziando a usare queste conoscenze per guidare la prevenzione. Nel 2015 l'emergere di un virus influenzale di tipo H5 in Cambogia ha messo in allarme gli esperti dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) perché alcuni marcatori genetici di questo virus ricalcavano quelli che, in laboratorio, aumentavano la trasmissione del virus per via aerea: un fattore che può fare la differenza tra un'epidemia localizzata e una pandemia catastrofica. È stata proprio questa informazione a indurre l'OMS a sviluppare un vaccino anche contro quel virus.

Altri ricercatori ritengono però che simili esperimenti non valgano i rischi. Le conoscenze così acquisite potrebbero tradursi in armi contro i virus solo dopo anni, o forse mai; i rischi invece sono concreti e seri. Questo rende azzardato fare calcoli di costi e benefici. In un editoriale pubblicato nel 2014 su «mBio», gli epidemiologi Marc Lipsitch, della Harvard School of Public Health, e Thomas V. Inglesby, del John Hopkins Center for Health Security, hanno affermato che le risorse potrebbero essere spese meglio con altri studi, leggermente meno informativi ma assai meno pericolosi, i cui benefici a lungo termine potrebbero essere paragonabili. Virus come Ebola o MERS sono esplosi negli esseri umani non perché ci mancassero le conoscenze necessarie, ma perché non siamo stati abbastanza attenti nella sorveglianza.

A dicembre 2014 Christophe Fraser, epidemiologo dell'Imperial College di Londra, a un simposio sul tema ha affermato che fidarsi troppo dei dati da esperimenti di guadagno di funzione potrebbe addirittura essere controproducente, portandoci a trascurare la sorveglianza su virus che non corrispondono a questi dati, ma che potrebbero ugualmente rivelarsi pericolosi. Viceversa, almeno una mutazione identificata come pericolosa in esperimenti su H5N1 è stata poi trovata in natura in ceppi di H1N1, ma in quest'ultimo, come mostrato dal gruppo di Fouchier in uno studio del 2010 su «Journal of Virology», non aveva effetti significativi.

Le scintille e l'incendio

Quelli di una pandemia da laboratorio non sono solo timori ipotetici. Forse, anzi, è già successo. C'è il forte sospetto, tra i virologi, che l'epidemia di influenza in Russia del 1977-1978 sia stata causata da una fuga da un istituto di ricerca. Il virus del 1977, for-

tunatamente leggero, aveva un genoma quasi identico a un ceppo virale isolato nel 1950, come venne stabilito già nel 1978 dall'analisi genomica pubblicata su «Nature» e ulteriormente confermato nel 2015 su «mBio» da Michelle Rozo e Gigi K. Grownall, del Johns Hopkins Center for Health Security. È assai improbabile che il virus sia rimasto geneticamente immutato per quasi trent'anni. Più plausibile, secondo i virologi, che sia stato conservato nei freezer dei laboratori sovietici e accidentalmente rilasciato durante lo sviluppo di un vaccino. Nel 2007 un'epidemia di afta epizootica nel Regno Unito è stata invece collegata alla perdita di materiale infetto da una tubatura di un istituto di ricerca.

Le infezioni da laboratorio sono purtroppo comuni. A Birmingham, nel Regno Unito, la fotografa medica Janet Parker fu l'ultima vittima di vaiolo della storia: colpita da una fuga del virus in laboratorio nel 1978, mentre il vaiolo era già estinto ormai da almeno un anno in natura. Dal 1981 al 2016 sono state accertate almeno 220 infezioni acquisite in laboratorio. In generale, per i laboratori di livello di sicurezza BSL-3, dove si lavora con patogeni capaci di causare malattie serie e trasmissibili per via aerea, come possono essere il bacillo della peste, il virus della febbre gialla, SARS-CoV e SARS-CoV-2, si registrano due infezioni accidentali all'anno ogni 1000 lavoratori. I laboratori di livello di sicurezza massimo BSL-4, dove si manipolano i patogeni più pericolosi come gli ebolavirus o il vaiolo, sono più sicuri ma non immuni da incidenti. Ci sono stati almeno quattro casi di infezione da Ebola originati in laboratorio, con un decesso. E dove c'è infezione c'è sempre la possibilità che il virus si propaghi.

Ogni fuga è come una scintilla sulla paglia secca: moltissime si spengono senza danno, ma ne basta una per provocare un incendio. Sappiamo per esempio che il coronavirus della SARS è sfuggito almeno sei volte dai laboratori di virologia. In almeno un caso propagandosi, con una vittima da infezione secondaria, la madre di una ricercatrice dell'Istituto nazionale cinese di virologia, e cinque casi di infezione terziaria.

Il pericolo del fattore umano

Bastano migliori tecnologie e protocolli di sicurezza? Il virologo Daniel R. Perez, direttore del gruppo che ha creato H7N1 capace di trasmettersi per via aerea, ritiene di sì, come ci ha dichiarato: «Il progetto dei laboratori, le misure di sicurezza e gli equipaggiamenti protettivi vanno ben oltre il necessario per minimizzare i rischi. Ci sono così tanti passaggi a prova di errore che mi è difficile pensare come tutto possa andare storto allo stesso tempo e rilasciare accidentalmente un patogeno. Un medico, un'infermiera o una persona che faccia acquisti in un mercato di animali vivi sono molto più a rischio di infettarsi di uno scienziato in un laboratorio.» Secondo un editoriale di «Nature» del 29 luglio 2014 però «molti incidenti non sono causati da una mancanza di barriere fisiche o di regolamenti, ma dalla mancanza di una forte cultura di sicurezza nei laboratori e nelle istituzioni che li ospitano». L'errore umano causa, a seconda delle stime, dal 67 all'80 per cento degli incidenti nei laboratori biologici di alta sicurezza.

Questi incidenti vanno dai più comuni e prevedibili, come punture dovute alla manipolazione di siringhe o morsi di animali infetti, ai più improbabili, come un caso, citato in un rapporto dei National Institutes of Health statunitensi, in cui il coperchio di una centrifuga si è scontrato con una piastra con pozzetti colmi di materiale infettivo, che si è rovesciato sul bancone del laboratorio.

Anche i laboratori dove si manipola materiale biologico «sicuro» comportano rischi. Spesso patogeni pericolosi sono inattivati per poter essere studiati anche in laboratori a bassa sicurezza, ma non sempre la procedura va a buon fine. Il Government Accountability Office degli Stati Uniti, l'organo supremo di *auditing* e valutazione indipendente del governo statunitense, ha contato dal 2003 al 2015 almeno 21 incidenti di inattivazione incompleta di patogeni ad alto rischio; tra questi, il bacillo dell'antrace e il virus Ebola.

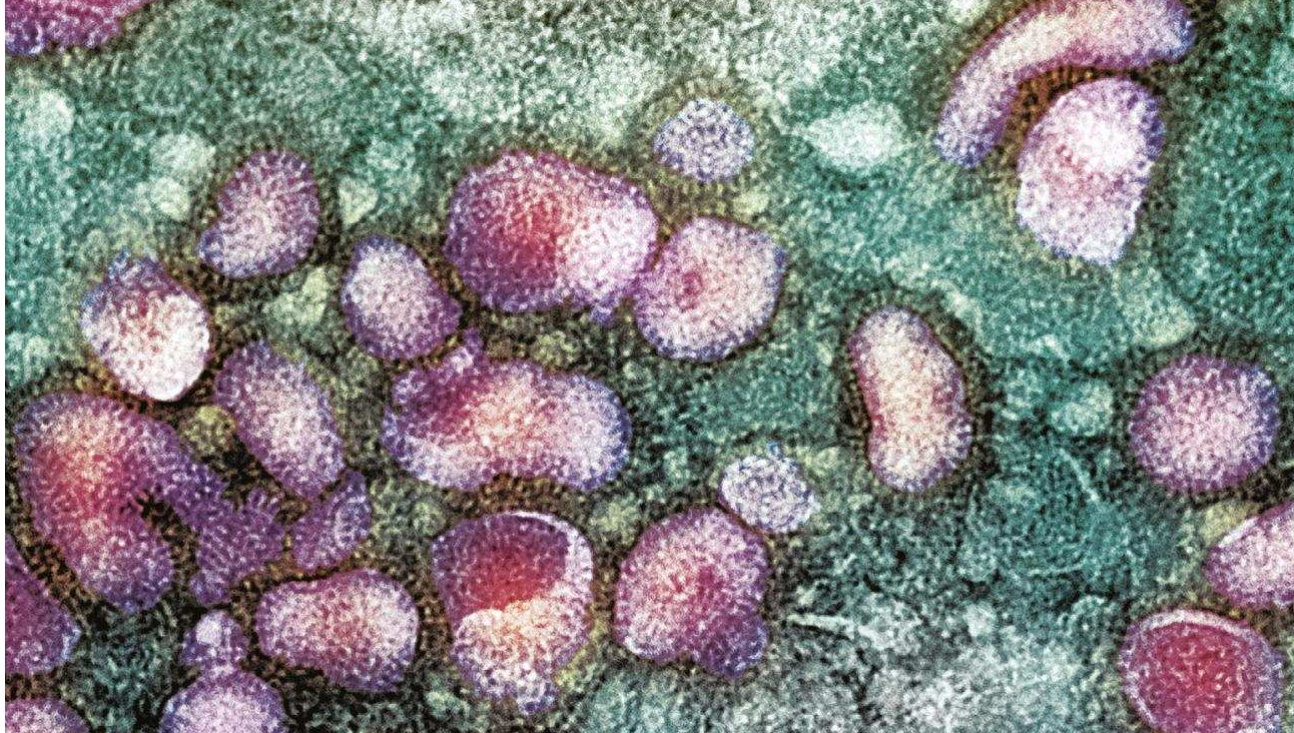
In Europa un caso inquietante, venuto alla luce nel 2016, è quello di una studentessa italiana che è stata infettata dall'HIV a Ginevra durante la tesi di laurea, nonostante in teoria lavorasse con un ceppo virale privo di un gene essenziale, quindi inattivo. Le analisi genetiche hanno confermato che il virus che l'ha infettata è lo stesso con cui lavorava in laboratorio. In qualche modo il gene mancante è arrivato per errore, probabilmente tramite altro materiale biologico manipolato nel laboratorio, ed è riuscito a rientrare nella coltura virale, esponendo la studentessa a un'infezione che nessuno poteva prevedere.

C'è infine l'incognita bioterrorismo. È un rischio considerato improbabile, ma non impossibile. Tra il 18 settembre e il 12 ottobre 2001 c'è stato il famoso caso delle lettere all'antrace inviate negli Stati Uniti, che hanno infettato 22 persone uccidendone cinque. L'identità del terrorista non è mai stata chiarita completamente, ma l'indagine dell'FBI ha concentrato i sospetti su Bruce Edwards Ivins, suicidatosi nel 2008, un microbiologo del laboratorio di ricerca medica militare di Fort Detrick, in Maryland, dove lavorava anche con il bacillo dell'antrace. Procedure di massima sicurezza possono proteggere contro un incidente, ma è molto più difficile difendersi da una persona determinata che ha accesso ai laboratori.

A seconda delle stime, l'errore umano causa dal 67 all'80 per cento degli incidenti nei laboratori biologici di alta sicurezza

Aprire una conversazione globale

Finora si è ragionato, spesso, a posteriori. La pubblicazione degli esperimenti sull'influenza del 2011 è stata bloccata sul nascere e permessa solo dopo mesi di controversie, a causa della possibilità che gli studi potessero essere usati a fini bioterroristici, ma ormai gli esperimenti erano stati fatti. In seguito alla pubblicazione di ulteriori esperimenti e a incidenti di sicurezza biologica, il 16 ottobre 2014 l'amministrazione Obama ha annunciato per gli Stati Uniti una moratoria, durata fino a fine 2017, sul finanziamento di esperimenti gain-of-function per i virus dell'influenza e i coronavirus SARS e MERS. Nel maggio 2016 il National Science Advisory Board for Biosecurity ha emesso le sue raccomandazioni, che sono state incluse nel cosiddetto HHS P3CO Framework. Si tratta del documento di riferimento in questo settore, per tutta la ricerca internazionale, le cui linee guida sono tutto sommato una lista di buon senso: deve esserci una solida revisione esterna, il rapporto tra costi e benefici deve giustificare la ricerca, non devono esserci metodi alternativi di giungere allo stesso risultato.

In generale non si tratta di norme di legge ma di regole interne per l'accesso ai fondi pubblici di ricerca, che dunque possono essere, e sono, scavalcate. La ricostruzione del vaiolo equino pubblicata nel 2018 è stata fatta in Canada e finanziata da un'azienda statuni-

Microscopiche ma letali. Particelle virali di H5N1, ingrandite circa 100.000 volte, in un'immagine ottenuta con la microscopia elettronica a trasmissione. Questi virus dell'influenza aviaria sono stati prelevati da un paziente in Vietnam, deceduto a causa dell'infezione.

NIBSC/SPL/AGF

tense. In altri paesi, come India e Cina, le regolamentazioni etiche sono indietro, e molte ricerche sono finanziate da privati.

Come sarà il futuro della ricerca virologica dopo la pandemia di Covid-19? Secondo Daniela Ovadia, neuroscienziata, giornalista scientifica ed esperta in bioetica e neuroetica, è difficile fare previsioni, ma a suo parere «ci potrebbe essere un potenziamento della ricerca sui potenziali virus pandemici in contesti sempre più legati alla ricerca militare, anche perché sono contesti che i governi si sentono in grado di controllare. E ci sarà un'esplosione di ricerca nel mondo delle biotech private. Il rischio è che tutto questo accada più segretamente di oggi, perché l'accettazione sociale di questi esperimenti tenderà a diminuire». In un mondo spaventato da Covid-19 sarà forte la tentazione di bloccare gli studi considerati pericolosi, ma per Ovadia le moratorie «sono scarsamente efficaci se non controproducenti: bloccano lo sviluppo delle competenze scientifiche dei ricercatori consapevoli dei rischi, ma certo non fermano i ricercatori malintenzionati o semplicemente megalomani, come si è visto nel caso delle bambine geneticamente modificate con la tecnologia CRISPR-Cas9 in Cina».

Di sicuro, se vogliamo dare un senso a questi esperimenti dovremo ascoltarli. Forse è questo il passaggio che manca. Gli esperimenti di Fouchier e Kawaoka, comunque la si pensi, hanno dimostrato che una pandemia da H5N1 è possibile, e che quindi è necessaria una stretta sorveglianza sul virus. Ma non è chiaro se applichiamo le lezioni di questi studi. Daniel R. Perez ci ha detto: «I nostri esperimenti ci danno l'evidenza scientifica del potenziale di alcuni patogeni di diventare pandemici. La nostra ricerca però è rilevante se c'è modo di fare il passo successivo. La mia in parte studia i virus influenzali noti come H9N2, endemici nei polli in molte parti del mondo. Sono virus molto simili a quelli che danno influenza nell'essere umano, e l'esposizione umana a H9N2 sembra elevata. Il mondo non sta facendo molto, non c'è nessuno sforzo sistematico per eliminarli e prevenirne la circolazione».

E per la pandemia da SARS-CoV-2? Sebbene esperimenti più sicuri avessero già identificato alcuni coronavirus del pipistrello come potenzialmente pericolosi, almeno uno di questi è stato riconosciuto come una minaccia solo grazie agli esperimenti di Baric, in cui questi virus sono stati resi capaci di attaccare le cellule umane. Un avvertimento importante, anche se non il solo, sulla pericolosità dei coronavirus esistenti in natura: se SARS-CoV-2 è esploso, forse è anche perché abbiamo trascurato questi dati.

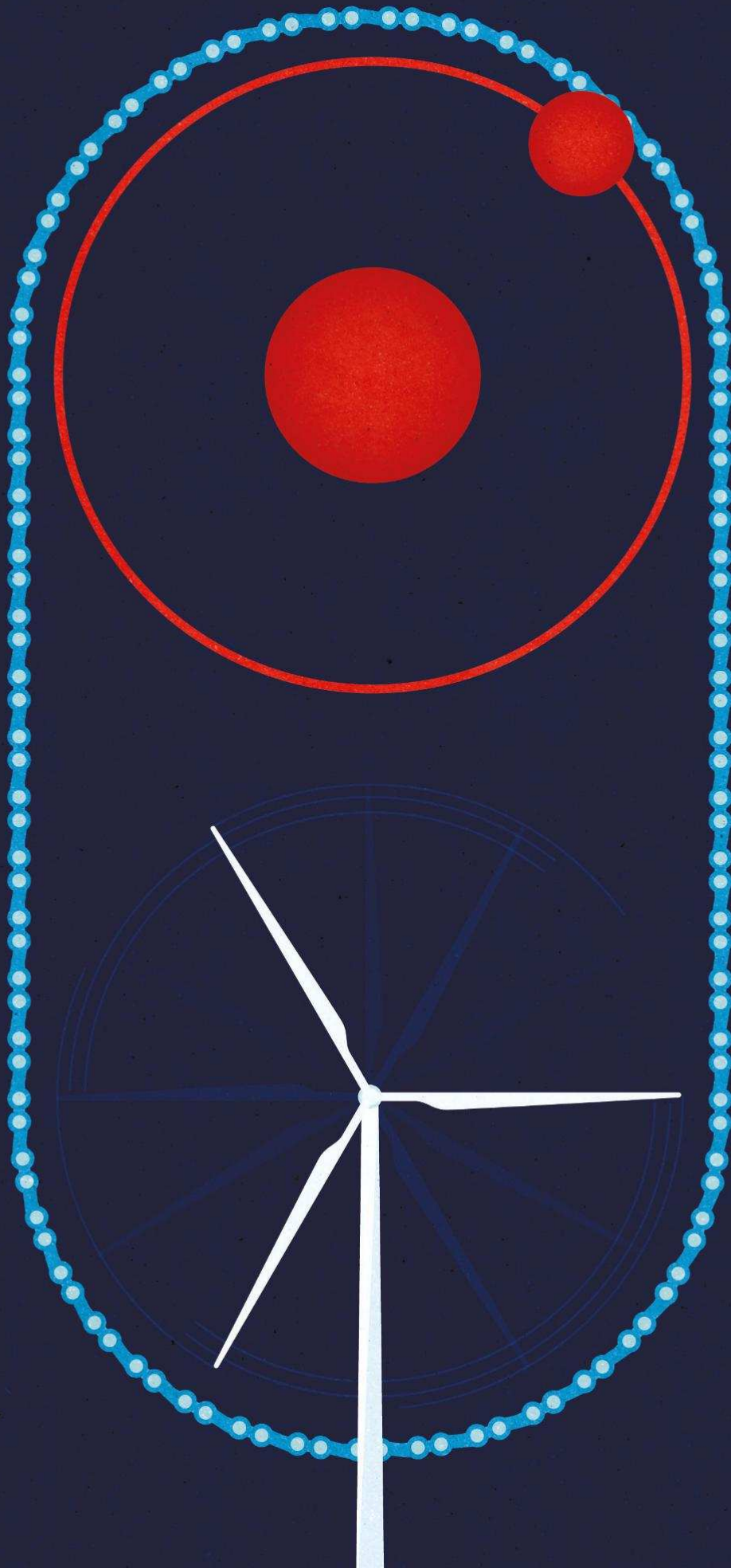
Comunque vada, il dibattito non può restare chiuso dietro le porte dell'OMS o delle agenzie scientifiche dei singoli paesi, ma deve includere il pubblico in una conversazione internazionale. Finora non c'è stata una vera discussione pubblica su questo tema. Tenere le porte chiuse ha portato solo confusione e sospetto sui mezzi di comunicazione, come ha denunciato Anthony Fauci, direttore dello statunitense National Institute for Allergy and Infectious Diseases, quando sono usciti gli esperimenti sul virus H5N1. Una situazione che, se ha permesso di sottovalutare o ignorare l'esistenza di rischi reali di sicurezza, dall'altro ha fomentato teorie del complotto o addirittura inchieste giudiziarie campate in aria. Come dimostra il caso della virologa italiana Ilaria Capua, additata come «trafficante di virus» a causa di un grossolano equivoco e indagata, per poi essere completamente prosciolta.

Alcuni ricercatori contattati per questo articolo hanno preferito non commentare, temendo – nell'attuale situazione – di essere presi di mira. È un timore comprensibile. Ma è probabile che solo con l'assoluta trasparenza il pubblico possa riguadagnare fiducia nella ricerca scientifica, specie quando questa prende decisioni che potrebbero avere un impatto enorme sulla nostra vita. ■

PER APPROFONDIRE

Characterization of the Reconstructed 1918 Spanish Influenza Pandemic Virus. Tumpey T.M. e altri, in «Science», Vol. 310, n. 5745, pp. 77-80, 7 ottobre 2005.

Airborne Transmission of Influenza A/H5N1 Virus Between Ferrets. Fouchier R.A.M. e altri, in «Science», Vol. 336, n. 6088, pp. 1534-1541, 22 giugno 2012.

Potential Risks and Benefits of Gain-of-Function Research. Summary of a Workshop. Institute of Medicine e National Research Council, The National Academies Press, Washington, 2015.

ENERGIA

La soluzione

L'energia che sfrutta l'idrogeno come vettore potrebbe di nuovo avere un ruolo di rilievo nello scenario delle fonti rinnovabili

di Peter Fairley

Illustrazione di Kotryna Zukauskaite

Peter Fairley vive tra Victoria, in Canada, e San Francisco, negli Stati Uniti, e scrive di energia e ambiente. È l'autore dell'articolo *Costruire una rete elettrica intelligente basata sul meteo* pubblicato su «Le Scienze» di ottobre 2018.

Nei tubi sotto le strade di Cappelle-la-Grande scorre idrogeno, che contribuisce a dare energia a 100 case di questo Comune nel nord della Francia. Su una stradina laterale adiacente al centro del paese, un nuovo elettrolizzatore contenuto in un piccolo capanno metallico bombarda l'acqua con elettricità proveniente da centrali eoliche e fotovoltaiche per generare idrogeno «rinnovabile» da immettere nel flusso di gas naturale che scorre già nei tubi. Sostituendo parte di quel combustibile fossile, l'idrogeno riduce fino a un massimo del 7 per cento le emissioni di carbonio della comunità, provenienti da caldaie, riscaldatori ad acqua calda e fornelli.

Il sistema di Cappelle-la-Grande è un laboratorio dal vivo creato da Engie, azienda parigina del settore energetico, che prevede una forte espansione dell'energia da idrogeno via via che il costo degli elettrolizzatori, come anche dell'elettricità rinnovabile, continuerà a scendere. Se Engie ha ragione, l'immissione dell'idrogeno nelle reti locali del gas potrebbe accelerare una transizione dall'energia fossile a quella pulita.

L'azienda è in buona compagnia. L'idrogeno rinnovabile è essenziale nella visione della Commissione Europea per raggiungere entro il 2050 la neutralità nelle emissioni di carbonio. E questo aspetto è sempre più importante anche per i colossi industriali del continente. A partire dal 2021, tutte le nuove turbine per centrali elettriche prodotte nell'Unione Europea (UE) dovranno essere in grado di bruciare una miscela di idrogeno e gas naturale, e i produttori dell'UE sostengono che le turbine saranno certificate per l'idrogeno puro entro il 2030. Nel frattempo le acciaierie europee fanno esperimenti per usare come combustibile nelle loro fornaci l'idrogeno rinnovabile al posto del carbone.

Se l'idea di alimentare le economie con l'idrogeno rinnovabile non vi sembra nuova, avete ragione. Quasi cent'anni fa J.B.S. Haldane, noto genetista e matematico britannico, immaginò un'epoca post-combustibili fossili, spinta da «grandi centrali elettriche» alimentate a idrogeno. All'inizio di questo secolo la visione ha assunto un fascino irresistibile. Nel 2002 il libro del futurologo Jeremy Rifkin *Economia all'idrogeno* ha profetizzato che il gas avrebbe dato il via a una nuova rivoluzione industriale. L'energia solare e quella eolica avrebbero scisso una risorsa illimitata, l'acqua, per produrre idrogeno per elettricità, riscaldamento ed energia per l'industria, dando un sottoprodotto gradito come l'ossigeno.

Nel 2003 il presidente statunitense George W. Bush, nel suo Discorso sullo stato dell'Unione, ha lanciato un poderoso stanziamento per la ricerca pari a 1,2 miliardi di dollari, per diffondere nel giro di una generazione i veicoli con celle a combustibile alimentati a idrogeno. Inoltre si sarebbero potute usare le celle a combustibile nei garage come riserva di energia per le case. Qualche mese dopo la rivista «Wired» ha pubblicato un articolo intitolato *How Hydrogen Can Save America*: l'idrogeno avrebbe posto fine alla dipendenza dal petrolio importato e sporco.

Nell'immediato, i progressi non sono stati all'altezza di aspettative così elevate. Sulla scena della mobilità verde sono diventate protagoniste le auto elettriche, meno costose e in rapido miglioramento. Nel 2009 l'Amministrazione del presidente Barack Obama ha messo in secondo piano il lavoro con l'idrogeno. Il fisico e premio Nobel Steven Chu, primo segretario per l'energia di Obama, ha spiegato che la tecnologia a idrogeno non era per niente pronta, e che le celle a combustibile e gli elettrolizzatori forse non avrebbero mai avuto costi sostenibili.

La ricerca però non si è fermata, e oggi lo stesso Chu riconosce che gradualmente si stanno superando alcuni ostacoli. La dimostrazione di Cappelle-la-Grande è solo un progetto piccolo, ma in tutto il mondo, a partire dall'Europa, si stanno avviando decine di installazioni sempre più grandi e ambiziose. Come ha osservato

IN BREVE

I progetti per convertire del tutto le nazioni all'elettricità rinnovabile non avranno successo se quei paesi non riconfigureranno i sistemi energetici, compresi i combustibili.

L'eccesso di energia solare ed eolica può alimentare elettrolizzatori che convertono l'acqua in idrogeno, che poi è distribuito in tubature e riconvertito in elettricità quando necessario.

L'idrogeno si può immagazzinare in serbatoi e grotte sotterranee, in modo da formare una rete in grado di alimentare l'industria e creare riserve per le reti elettriche.

Durk Gardenier/Alamy

Gli elettrodi in una cella elettrolitica scindono le molecole d'acqua in ossigeno (*a sinistra*) e idrogeno. Gli elettrodi sono alti un centimetro.

un recente rapporto dell'International Energy Agency, «sotto l'aspetto politico ed economico l'idrogeno ha attualmente uno slancio senza precedenti, con una quantità di politiche e progetti in rapida crescita a livello mondiale».

Stavolta l'interesse per l'idrogeno è motivato dalla spinta a decarbonizzare non tanto i trasporti, quanto la rete elettrica e l'industria pesante. «Nella comunità della modellizzazione energetica tutti pensano molto seriamente a una forte decarbonizzazione», spiega Tom Brown, capo di un gruppo di modellizzazione energetica al Karlsruher Institut für Technologie, in Germania. Città e Stati stanno esplorando percorsi con cui raggiungere una neutralità carbonica quasi completa entro il 2050, per lo più adottando energia eolica e solare a basse emissioni.

Questa strategia però presenta due problemi, spesso sottintesi. Innanzitutto le reti elettriche esistenti non sono in grado di gestire le grandi quantità di energia rinnovabile necessarie per escludere le centrali elettriche alimentate da combustibili fossili. Inoltre servirebbero ancora centrali di riserva in caso di lunghe carenze di Sole o vento. Oggi quella riserva arriva da centrali a gas naturale, a carbone e nucleari che i gestori della rete possono accendere e spegnere rapidamente per compensare i cali e i picchi della produzione energetica da fonti rinnovabili.

Secondo i suoi sostenitori, l'idrogeno può svolgere la stessa funzione. Quando vento e Sole sono disponibili in abbondanza, le celle elettrolitiche possono usare parte di quell'energia per generare idrogeno, che si conserva in vista dei giorni di pioggia. Quindi l'idrogeno immagazzinato sarebbe riconvertito in elettricità, con celle a combustibile o turbine, per sostenere la rete.

Ridurre fortemente il carbonio significa anche trovare combustibili sostitutivi per quei segmenti dell'economia in cui non basta collegarsi a una grossa presa: è il caso dei trasporti pesanti, oltre che delle materie prime sostitutive per sostanze e materiali che oggi si basano su petrolio, carbone e gas naturale. «Troppe persone sono state indotte a credere che per risolvere il problema bastasse l'elettrificazione», spiega Jack Brouwer, esperto di energia all'Università della California a Irvine, che da oltre vent'anni progetta soluzioni per l'aria inquinata della sua regione. «E molti nostri enti statali e legislatori – continua – si sono accodati», senza pensare a come si potesse immagazzinare l'energia o alimentare l'industria.

L'idrogeno rinnovabile può rendere possibile una rete con energia pulita? E per l'industria potrebbe essere una soluzione plausibile? Si stanno facendo scommesse interessanti, anche senza sapere se l'idrogeno riuscirà a diffondersi rapidamente e a costi sostenibili.

Stasi buie

Le poche nazioni che hanno puntato molto sulla sostituzione di carbone e gas naturale con Sole e vento mostrano già segni di affaticamento. Nel 2018 in Germania le fonti rinnovabili hanno coperto una quota della produzione elettrica intorno al 40 per cento, ma con enormi fluttuazioni. In alcuni giorni l'energia eolica e quella solare hanno superato il 75 per cento del totale nazionale, mentre in altri giorni questa quota è scesa fino al 15 per cento. I gestori della rete affrontano questi alti e bassi regolando la produzione delle centrali a combustibili fossili, nucleari, idroelettriche e di grandi batterie. Inoltre, sempre più spesso eolico e solare superano la quantità di energia che può essere assorbita dalle linee di trasmissione congestionate della Germania, costringendo i gestori della rete a spegnere alcuni generatori rinnovabili: così nel solo 2017 si è persa energia per un valore di 1,4 miliardi di euro.

In futuro il problema più grande per le nazioni sarà riuscire a cavarsela dopo la chiusura prevista per le centrali a combustibili fossili (e, in Germania, anche quelle nucleari). Come faranno i gestori

A sostegno della rete

Nelle giornate ventose o soleggiate, l'elettricità in eccesso può essere sfruttata per alimentare elettrolizzatori (*sotto, a sinistra*) che scindono l'acqua in idrogeno e ossigeno. L'idrogeno si può immagazzinare, e se in giornate calme o poco soleggiate scarseggiano le fonti di energia rinnovabile, il gas può alimentare una turbina (*in basso*) che genera elettricità con cui sostenere la rete. Inoltre l'industria può usare l'idrogeno direttamente come combustibile e materia prima, al posto dei combustibili fossili o dell'idrogeno che oggi si produce dal gas naturale.

Energia eolica

Energia solare

Catodo Membrana Anodo

Gas di idrogeno

Gas di ossigeno

Ingresso d'acqua

Rete elettrica

Case

Elettrolizzatore

Industria

L'idrogeno crea l'elettricità

Quando la rete ha bisogno di elettricità, l'idrogeno immagazzinato è inviato a una turbina a gas. Quindi è iniettato come combustibile in una camera di combustione, dove si mischia con l'aria compressa e si incendia, generando un flusso di gas ad alta pressione che mette in movimento le pale di una turbina, che fanno girare un generatore producendo elettricità.

Presa d'aria

Compressore

Albero di potenza

Turbina

Scarico

Combustibile nella camera di combustione

Al generatore di elettricità

Turbina a gas

L'elettricità crea l'idrogeno

Gli elettrolizzatori hanno svariate progettazioni. In un sistema diffuso (*illustrato*), le molecole d'acqua reagiscono con un anodo, scindendosi in molecole di ossigeno e ioni idrogeno. L'ossigeno è liberato nell'aria. Gli ioni idrogeno attraversano una membrana polimerica arrivando a un catodo, dove reagiscono formando molecole di idrogeno gassoso, che sono immagazzinate.

Deposito di idrogeno

Illustrazione di 5W Infographics

delle reti a tenere le luci accese nei periodi poco soleggiati e senza vento? In Germania gli esperti di modellizzazione energetica hanno inventato un termine per indicare queste carenze di energie rinnovabili: *Dunkelflauten,* «stasi buie». Secondo studi meteorologici, in Stati Uniti e Germania le reti elettriche dovrebbero compensare Dunkelflauten lunghe fino a due settimane.

Reti di trasmissione più robuste potrebbero contribuire ad affrontare le Dunkelflauten spostando l'elettricità da una parte all'altra di grandi regioni o perfino continenti, inviando enormi quantità di energia da zone piene di vento o Sole in un certo giorno a luoghi distanti, poco ventilati o nuvolosi. L'espansione della rete però è un cammino lungo e faticoso. In tutta la Germania l'aggiunta di linee elettriche è in ritardo di anni, ostacolata dalle proteste delle comunità. Negli Stati Uniti l'approvazione di nuove linee è bloccata da opposizioni analoghe.

Alcuni esperti ritengono quindi che le Dunkelflauten rendano rischiosa l'energia eolica e solare. Per esempio, simulazioni di reti effettuate nel 2018 da esperti di modelli energetici al Massachusetts Institute of Technology (MIT) prevedono un aumento esponenziale dei costi via via che le reti si avvicineranno al 100 per cento di energia rinnovabile. E questo perché hanno presupposto la necessità di installare e mantenere sempre cariche batterie grandi e costose, anche nel caso in cui servano solo per pochi giorni o addirittura poche ore in un anno.

L'ostacolo maggiore per il futuro dell'idrogeno rinnovabile potrebbe essere il costo degli elettrolizzatori. Per fare progressi, la produzione del gas deve scendere dai circa quattro dollari o più al chilogrammo di oggi a due dollari o meno

Nel 2018 in California un gruppo di accademici è arrivato a una conclusione analoga: perfino con grandi linee di trasmissione e batterie, per l'energia solare ed eolica sarebbe possibile coprire solo l'80 per cento circa del fabbisogno elettrico degli Stati Uniti. Serviranno sicuramente altre fonti di energia, ha affermato alla pubblicazione dello studio Ken Caldeira, membro del gruppo e climatologo alla Carnegie Institution for Science.

Alcuni esperti europei sostengono che gli studi del MIT e dell'Università della California siano poco lungimiranti. Da alcuni decenni i ricercatori europei vedono una prospettiva più ampia, passando dalla rete elettrica a una visione complessiva che considera l'intero spettro dell'energia usata nella società moderna. Inaugurati da Bent Sørensen, fisico dell'Università di Roskilde, e da vari *protégé* danesi, questi studi dei «sistemi energetici integrati» abbinano le simulazioni di reti elettriche, reti di distribuzione di gas naturale e idrogeno, sistemi di trasporto, industrie pesanti e riscaldamenti centralizzati.

I modelli dimostrano che il collegamento tra questi settori permette una flessibilità operativa, e a questo scopo l'idrogeno è una soluzione efficace. In questo scenario, una rete elettrica alimentata al 100 per cento da fonti rinnovabili potrebbe avere successo se si usasse l'idrogeno per immagazzinare l'energia in modo da coprire le Dunkelflauten, senza l'aumento dei prezzi visto nelle proiezioni del MIT.

Alcuni studi statunitensi sulle reti hanno escluso lo stoccaggio dell'energia da idrogeno perché oggi è costoso. Ma altri esperti di modelli sostengono che sia un ragionamento fallace. Per esempio molti studi sulle reti pubblicati una decina di anni fa sminuivano l'energia solare perché all'epoca era costosa: era un presupposto sbagliato, visto che da allora i costi sono calati molto. Le simulazioni europee, come quella di Brown, considerano le riduzioni dei costi previste per calcolare i modi più economici di eliminare le emissioni di carbonio. Ne emerge uno sviluppo degli elettrolizzatori che riduce il costo dell'idrogeno rinnovabile.

Nei modelli le celle elettrolitiche si diffondono innanzitutto per sostituire l'idrogeno prodotto con il gas naturale, usato da stabilimenti chimici e raffinerie di petrolio in varie fasi della lavorazione. A livello mondiale la produzione di idrogeno «grigio» (come lo chiamano gli esperti di energia) emette ogni anno oltre 800 milioni di tonnellate di anidride carbonica: quanto le emissioni totali di Regno Unito e Indonesia insieme, secondo l'International Energy Agency. Sostituire l'idrogeno grigio con quello rinnovabile riduce l'impronta di carbonio dell'idrogeno per uso industriale. Inoltre una certa quantità di idrogeno potrebbe sostituire gas naturale e gasolio consumati da autocarri pesanti, autobus e treni. Anche se le celle a combustibile stentano a reggere il confronto con le batterie delle auto, per i veicoli più pesanti potrebbero essere più pratiche: l'azienda Nikola Motor Company, che sviluppa autocarri, sostiene che gli autoarticolati che sta mettendo in commercio percorreranno da 800 a 1200 chilometri circa con una cella a combustibile piena, in base ai vari equipaggiamenti e carichi trasportati.

Se industria e trasporti pesanti adottassero l'idrogeno rinnovabile, potrebbero emergere reti regionali per distribuirlo, che inoltre potrebbero portare il gas privo di carbonio alle centrali che producono riserve per le reti elettriche. È quello che accade nelle simulazioni dell'energia integrata: via via che si crea e si consuma sempre più idrogeno rinnovabile, si sviluppano reti distributive di massa che immagazzinano il gas, in quantità sufficienti per mesi, in grandi serbatoi o grotte sotterranee, proprio come oggi si immagazzina il gas naturale, a un costo minore rispetto alla conservazione dell'elettricità in batterie. «Una volta riconosciuto che l'idrogeno è importante per gli altri settori, lo stoccaggio a lungo termine per il settore energetico arriva come una specie di sottoprodotto», commenta Brown.

Quella prospettiva si concretizza nelle simulazioni di Christian Breyer, della LUT University, in Finlandia. Nei più recenti scenari dell'energia rinnovabile al 100 per cento realizzati dal suo team e pubblicati nel 2019 con l'Energy Watch Group, un gruppo internazionale di scienziati e parlamentari, si attivano centrali elettriche che bruciano l'idrogeno immagazzinato per colmare le lacune della rete durante le Dunkelflauten più gravi. «Sono una risorsa di ultima istanza», spiega Breyer. «Senza queste grandi turbine, in alcune ore dell'anno non avremmo un sistema energetico stabile».

Nel modello di Breyer si riconverte in elettricità meno della metà dell'energia eolica e solare necessaria per produrre e stoccare l'idrogeno; è una perdita notevole, e i generatori con turbine a idrogeno restano attivi solo per poche settimane l'anno. Tuttavia la scarsa efficienza della conversione da idrogeno a elettricità non provoca una bancarotta, visto che questo percorso si usa raramente. Secondo Breyer questo piano è la soluzione più economica

per il sistema energetico su vasta scala, e non è poi molto diverso dall'uso che oggi molte reti elettriche fanno delle centrali alimentate a gas naturale. E aggiunge: «Da decenni esistono centrali elettriche che si attivano solo ogni qualche anno».

Condotte riconvertite

Anche se oggi se ne genera una quantità scarsa, l'Europa sta puntando sull'idrogeno rinnovabile per decarbonizzare i propri sistemi energetici. La Commissione Europea prevede che nel 2050 le fonti rinnovabili arriveranno a coprire più dell'80 per cento della produzione energetica continentale, con oltre 50 gigawatt – pari grosso modo alla capacità di 50 centrali nucleari – generati dalle celle elettrolitiche. Anche gli Stati membri si stanno ponendo obiettivi. La Francia invita le sue industrie che consumano idrogeno a raggiungere una quota del 10 per cento di idrogeno rinnovabile entro il 2022 e tra il 20 e il 40 per cento entro il 2027.

Sarà difficile realizzare questi obiettivi senza politiche che incoraggino le imprese ad avviare con forza la produzione in massa degli elettrolizzatori. Un punto di partenza è far confluire l'idrogeno nelle condotte del gas naturale, usando così un'infrastruttura già presente. Per molto tempo gli ingegneri avevano dato per scontato che l'idrogeno molecolare – la molecola più piccola e molto reattiva – nelle condotte del gas naturale già esistenti si sarebbe degradato o sarebbe sfuggito nell'ambiente esterno. Ricerche recenti dimostrano però che si può miscelare l'idrogeno fino a una quota del 20-25 per cento senza perdite o danni ai gasdotti. I paesi europei permettono la miscelazione, e in decine di siti in Italia, Germania, Regno Unito e altrove si sta iniettando idrogeno per contribuire ad alimentare termosifoni, fornelli e altri apparecchi in casa dei consumatori, senza bisogno di modifiche purché il contenuto di idrogeno resti inferiore al 25 per cento circa.

A Cappelle-la-Grande, Engie esegue questa miscelazione da oltre un anno senza incidenti od opposizioni, come racconta la project manager Hélène Pierre. E spiega che l'accettazione da parte delle persone è merito anche di un monitoraggio approfondito, che dimostra come nelle case dove si usa la miscela l'aria sia più pulita; l'aggiunta dell'idrogeno – osserva – migliora la combustione del gas negli elettrodomestici, riducendo i livelli di sostanze inquinanti, come il monossido di carbonio, che si creano quando il gas naturale non brucia completamente.

In Europa la prossima ondata di progetti con l'idrogeno rinnovabile potrebbe spingere la crescita della produzione. In Francia e in Germania alcuni consorzi industriali cercano finanziamenti e autorizzazioni per celle elettrolitiche da 100 megawatt, dieci volte più grandi rispetto alla più grande oggi in funzione. Due enormi progetti di elettrolizzatori stanno richiedendo il sostegno del governo per stimolare un'economia regionale basata sull'idrogeno nella zona di Lingen, una città nel nord-ovest della Germania che ospita un paio di raffinerie petrolifere.

A offrire un modello per una rete nazionale dell'idrogeno potrebbe essere un progetto cui partecipano Enertrag, una grande azienda di servizi, e varie tra le principali società energetiche e di ingegneria tedesche. Il progetto si basa sull'infrastruttura del gas già esistente, ma non per la miscelazione. L'idea invece è riconvertire gasdotti inutilizzati per trasportare l'idrogeno rinnovabile alle raffinerie locali, come anche a una centrale elettrica e addirittura a una futura stazione di rifornimento per veicoli con celle a combustibile. «Puntiamo a realizzare una rete del gas destinata al 100 per cento all'idrogeno», spiega Frank Heunemann, amministratore delegato di Nowega, operatore della rete regionale del gas e tra i partner del progetto.

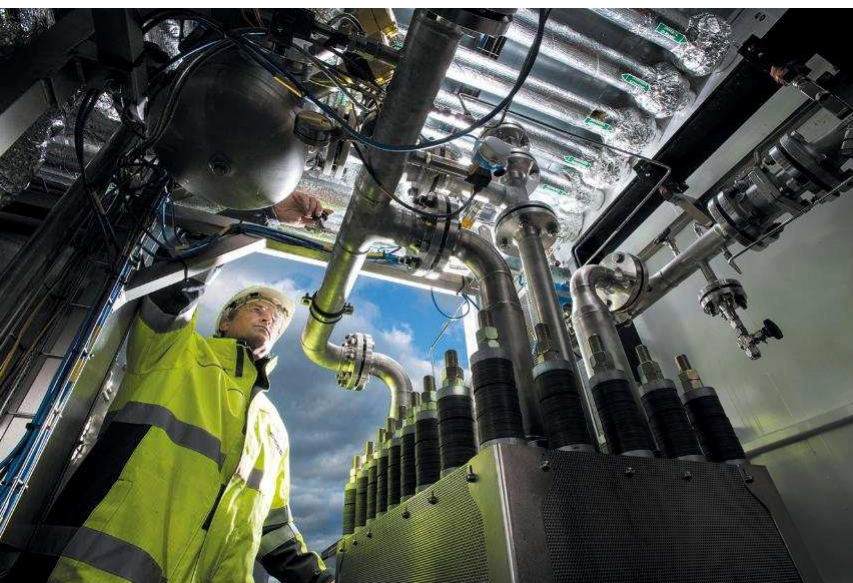
Nowega può riusare alcuni gasdotti vuoti perché in questa regione ci sono due reti del gas naturale. Una trasporta quello normale, costituito quasi solo da metano, mentre l'altra era stata costruita inizialmente per trasportare gas naturale locale, ricco di acido solfidrico, e l'idrogeno può rendere fragili alcuni tubi di acciaio. Nowega sta via via escludendo il gas locale, lasciando vuoti tubi in acciaio che secondo Heunemann dovrebbero riuscire a sopportare eventuali reazioni con l'idrogeno puro. Il fornitore di energia europeo RWE costruirà l'elettrolizzatore principale del consorzio e prevede di bruciare parte della produzione di idrogeno nella sua centrale elettrica di Lingen. Il colosso dell'ingegneria Siemens punta a ottimizzare una delle quattro turbine a gas della centrale in modo da gestire l'idrogeno puro.

Il consorzio pensa anche a un'espansione. Lingen si trova a circa 48 chilometri da miniere di sale sotterranee, create per lo stoccaggio del gas naturale. Secondo Heunemann, nella prossima fase sarebbe logico immagazzinare parte dell'idrogeno di Lingen in una di queste caverne, a oltre 1000 metri di profondità. Già oggi in Stati Uniti, nel Texas e nel Regno Unito si stoccano grandi masse di idrogeno nelle grotte.

Secondo l'International Energy Agency, l'idrogeno ha bisogno dello stesso tipo di sostegno governativo che ha favorito i primi passi di solare ed eolico, che oggi attraggono oltre 100 miliardi di dollari all'anno di investimenti

Nowega immagina inoltre una rete di gasdotti lunga 3200 chilometri, che potrebbe raggiungere la maggior parte di acciaierie, raffinerie e stabilimenti chimici in Germania. Il piano si basa sulla riconversione delle condotte per gas naturale che in origine erano state costruite per trasportare il «gas di città», ricco di idrogeno e ricavato dal carbone, che era diffuso in Europa fino agli anni sessanta. I gasdotti che storicamente tolleravano l'idrogeno al 50 per cento – commenta Heunemann – si dovrebbero usare senza problemi anche «per l'idrogeno al 100 per cento».

Il futuro è incerto

L'interesse crescente per l'idrogeno rinnovabile non riguarda solo l'Europa. Il Giappone ha in programma per i prossimi decenni uno spostamento verso una «società dell'idrogeno», inserita nella politica energetica ufficiale fin dal 2014. Il paese dovrebbe cominciare a raggiungere uno dei suoi primi obiettivi – la dimostrazione di una tecnologia in grado di importare l'idrogeno efficacemente – nel 2020, trasportando con petroliere l'idrogeno grigio dal Brunei, una piccola nazione ricca di gas situata nel Borneo. In Australia, partiti politici rivali stanno mettendo a punto progetti concorrenti per esportare idrogeno in Giappone. A dicembre 2019 i ministeri dell'energia dei vari Stati e territori australiani hanno adottato una strategia nazionale per l'idrogeno, e il gover-

Un ingegnere controlla i tubi che distribuiscono l'idrogeno prodotto con energia rinnovabile ad Amburgo.

Joerg Boethling/Alamy

no nazionale ha annunciato un pacchetto di incentivi pari a 370 milioni di dollari australiani (circa 230 milioni di euro).

Ci sono segnali di un interesse rinnovato perfino negli Stati Uniti. Ancora una volta il governo pone obiettivi per le tecnologie a idrogeno, alcune aziende del settore energetico investono e qualche Stato offre un sostegno. A fare da apripista potrebbe essere Los Angeles, in California. Il *Green New Deal* di L.A., presentato dal sindaco Eric Garcetti ad aprile 2019, impegna la città a raggiungere l'80 per cento di elettricità rinnovabile entro il 2030 e il 100 per cento entro il 2050. Il sindaco sta proponendo piani per realizzare parchi fotovoltaici e sta facendo costruire una nuova centrale elettrica a gas naturale che garantisca alla città una fonte di energia di riserva. Quella centrale potrebbe essere convertita e alimentata a idrogeno rinnovabile; ci sono già circa 125 chilometri di gasdotti che trasportano idrogeno grigio alle raffinerie della zona. E le celle a combustibile sono in gara con le batterie nei progetti per modificare la trazione di circa 16.000 autocarri che trasportano merci ai porti della regione. Se quei veicoli fossero alimentati a idrogeno invece che a gasolio, potrebbe essere un netto miglioramento per il cielo offuscato di Los Angeles.

Brouwer sostiene che tutta la California deve riflettere sull'energia nel tentativo di eliminare le emissioni di carbonio. Secondo proiezioni del Lawrence Berkeley National Laboratory, entro il 2025 la California potrebbe sprecare ogni anno un potenziale di oltre 8 terawattora di energia rinnovabile; secondo Brouwer, la California dovrebbe invece conservare questa energia sotto forma di idrogeno per ripulire le proprie raffinerie e soddisfare la crescente domanda di elettricità nelle ondate di caldo estive.

Altri esperti concordano sul fatto che l'idrogeno possa essere la soluzione a questi problemi. Uno studio dell'Energy Futures Initiative, un *think tank* diretto da Ernest Moniz, ex fisico nucleare del MIT e secondo segretario dell'energia per Obama, auspica che la California non si faccia sfuggire il «valore enorme» offerto dall'idrogeno rinnovabile e da altri combustibili a basse emissioni. Lo studio conclude che senza di loro, per la California potrebbe essere impossibile raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione.

Sono numerosi i potenziali problemi che potrebbero ancora ritardare o impedire la crescita dell'infrastruttura dell'idrogeno in California, in Europa e altrove. Una questione ricorrente è l'ansia del pubblico. L'idrogeno è estremamente infiammabile, e capitano incidenti. L'estate scorsa in Norvegia una valvola difettosa ha provocato un'esplosione di idrogeno in una stazione di rifornimento per auto con celle a combustibile. Le pareti antiesplosione in cemento hanno ridotto al minimo i danni alle persone, ma subito i mezzi di comunicazione si sono chiesti se questo incidente potesse significare la fine dell'energia da idrogeno. Nel novembre 2019 il governatore della California Gavin Newsom ha chiesto alla commissione statale dei pubblici servizi di accelerare la chiusura di un deposito sotterraneo di gas, dove una perdita di gas naturale, avvenuta quattro anni prima e durata quattro mesi, aveva provocato l'evacuazione di migliaia di famiglie.

Tutte le opzioni energetiche presentano rischi, e l'opposizione delle comunità complica molte strade verso l'energia senza emissioni di carbonio. In molti luoghi l'opinione pubblica non ha una gran simpatia per l'energia nucleare, le linee di trasmissione o le turbine eoliche. Il maggiore ostacolo per un futuro con l'idrogeno rinnovabile potrebbe però essere il costo degli elettrolizzatori. Per cominciare a sostituire l'idrogeno grigio nell'industria, il costo di produzione dell'idrogeno rinnovabile deve scendere dai circa 4 dollari o più al chilogrammo di oggi a 2 dollari o meno. Secondo diversi studi, potrebbe avvenire entro il 2030, se i costi degli elettrolizzatori continueranno a diminuire come hanno fatto negli ultimi anni.

Gli studi portano inoltre a ritenere che uno scenario di questo tipo possa presentarsi solo con incentivi dei governi. Secondo un rapporto recente dell'International Energy Agency, l'idrogeno ha bisogno dello stesso tipo di sostegno governativo che ha favorito i primi passi dell'energia solare e di quella eolica, due industrie che oggi in tutto il mondo attraggono investimenti per oltre 100 miliardi di dollari l'anno. Quegli esempi, scrive l'agenzia, dimostrano che «l'innovazione di politiche e tecnologie ha il potere di creare industrie globali dell'energia pulita».

Potrebbe essere in arrivo una tecnologia migliorata. Sta per essere immessa sul mercato una nuova classe di celle elettrolitiche, con modelli a ossidi solidi che producono quasi il 30 per cento in più di idrogeno rispetto agli elettrolizzatori con membrana a scambio protonico usati da Engie, i più diffusi nel settore. L'ex scettico segretario dell'energia Steven Chu, oggi professore alla Stanford University, lavora a un elettrolizzatore innovativo, basato su componenti più ravvicinati e altri accorgimenti per produrre l'idrogeno più velocemente e con meno energia. Secondo Chu, le modifiche potrebbero determinare «un'enorme differenza nei costi di esercizio». È solo un altro motivo, continua Chu, per cui l'idrogeno comincia a convincerlo. ■

PER APPROFONDIRE

Hydrogen Roadmap Europe. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, febbraio 2019.

The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. Rapporto sulla tecnologia, International Energy Agency, giugno 2019.

Economia all'idrogeno. Wald M.L., in «Le Scienze» n. 430, giugno 2004.

NEUROSCIENZE

Mappe neurali per orientarsi nella vita

Circuiti neurali che tracciano la nostra posizione nello spazio e nel tempo svolgerebbero anche un ruolo vitale nel determinare i nostri rapporti con gli altri

di Matthew Schafer e Daniela Schiller

Spesso ci dicono che nella vita non ci sono scorciatoie. Ma il cervello, anche quello di un topo, è cablato in modo da ignorare completamente il monito. Quest'organo, in effetti, incarna una macchina per scoprire scorciatoie. Il primo segno che il cervello ha un talento per la scoperta di strade alternative fu descritto nel 1948 Edward Tolman, dell'Università della California a Berkeley.

Tolman eseguì un esperimento singolare: un topo affamato correva attraverso un tavolo circolare ed entrava in un passaggio stretto e buio; il roditore girava a sinistra, poi a destra e poi ancora a destra, per affrettarsi quindi verso l'estremità di una stretta striscia bene illuminata dove, finalmente, lo aspettava una ciotola di cibo. Nessuna scelta da fare: l'animale doveva seguire l'unico tortuoso percorso disponibile. E così fece, più e più volte, per quattro giorni.

Il quinto giorno, mentre correva di nuovo attraverso il tavolo dritto verso il passaggio, urtò contro un ostacolo: il percorso era bloccato. Tornò indietro e cominciò a cercare alternative, ma il tavolo, da rotondo che era, nottetempo era stato trasformato in una specie di arena. Ora, invece di uno solo, di percorsi da esplorare ce n'erano 18, che si irradiavano da ogni parte del tavolo. Dopo incursioni di pochi centimetri in alcuni di essi, il topo scelse infine di correre fino in fondo al percorso numero sei, quello che conduceva direttamente al cibo.

Prendere la strada diretta verso una ciotola di cibo senza esperienze precedenti potrebbe sembrare un compito banale, ma per gli psicologi comportamentali dell'epoca il successo del topo nell'orientarsi fu un'impresa notevole. All'epoca la scuola ufficiale in materia di apprendimento animale sosteneva che il comportamento del topo nel labirinto si limitasse ad associazioni tra lo stimolo e la risposta: quando gli stimoli ambientali generavano affidabilmente una risposta efficace, le connessioni neurali che rappresentano l'associazione si rafforzavano.

Secondo questa teoria, il cervello opera come una

Illustrazione di Richard Borge

centralina telefonica che conserva solamente le connessioni affidabili tra le chiamate in arrivo dagli organi di senso e i messaggi in uscita ai muscoli. Ma la centralina comportamentale non spiegava la capacità di scegliere correttamente una scorciatoia, così su due piedi, senza avere prima provato quella specifica strada. Le scorciatoie, e molte altre affascinanti osservazioni simili, hanno alimentato una scuola di pensiero alternativa, promossa da teorici, secondo i quali, nel corso dell'apprendimento, nel cervello del topo si consolida una mappa. Tolman, uno degli ispiratori di questa scuola di pensiero, coniò il termine *mappa cognitiva*.

Secondo Tolman, il cervello non si limita a imparare associazioni dirette tra stimoli. In effetti, queste associazioni sono spesso labili, rese obsolete dai cambiamenti nell'ambiente. Come gli psicologi hanno imparato nei decenni trascorsi dagli studi di Tolman, il cervello costruisce, archivia e usa anche mappe mentali. Questi modelli del mondo ci permettono di orientarci nell'ambiente circostante, anche in luoghi complessi e mutevoli, permettendo all'occorrenza la flessibilità per usare scorciatoie o deviazioni. Il topo affamato degli esperimenti di Tolman deve aver ricordato la posizione del cibo, ricavata dall'angolo verso di esso, e scelto la via che lo avrebbe condotto più probabilmente alla meta. In parole povere, deve avere costruito un modello dell'ambiente.

Questa costruzione di modelli, o creazione di mappe, si estende oltre lo spazio fisico. Ci sarebbero mappe mentali anche al cuore di molte capacità tipicamente «umane», come la memoria, l'immaginazione, le inferenze, il ragionamento astratto e persino la dinamica delle interazioni sociali. I ricercatori hanno cominciato a studiare se le mappe mentali documentano quanto un individuo è distante da un altro, o vicino, e dove si trova quell'individuo nella gerarchia sociale di un gruppo. Ma come fa il cervello a creare le mappe che ci permettono di orientarci nel mondo?

Una mappa spaziale

I primi indizi di una base neurale delle mappe mentali risalgono agli anni settanta. Studiando l'ippocampo dei roditori, John O'Keefe e il suo allievo Jonathan Dostrovsky, dello University College di Londra, scoprirono una particolare classe di neuroni che si attivavano quando i topi occupavano posizioni specifiche nel loro ambiente. Alcuni di questi neuroni scaricavano quando l'animale era in una particolare posizione; altri si attivavano quando si spostava nel punto successivo lungo la strada che stava percorrendo, come se le cellule fossero specializzate nel rilevare la posizione del topo nello spazio. Collegando sequenze di queste *place cell*, o cellule di posizione, i ricercatori riuscirono a ricostruire la traiettoria esplorativa di un animale. Studi svolti nei decenni seguenti hanno confermato l'esistenza di cellule di posizione in altri animali, incluso l'uomo, e chiarito molte loro proprietà. Strada facendo, sono emersi vari tipi cellulari, ciascuno dei quali contribuisce in modo esclusivo alla codifica delle rappresentazioni spaziali nel cervello.

Matthew Schafer, dottorando in neuroscienze alla Mount Sinai Icahn School of Medicine di New York, studia i meccanismi neurali della cognizione sociale nel cervello.

Daniela Schiller è professoressa associata di neuroscienze e psichiatria alla Mount Sinai Icahn School of Medicine, dove studia i meccanismi neurali alla base del controllo emotivo che servono per adattarsi ai mutamenti ambientali.

Nella vicina corteccia entorinale, una regione connessa all'ippocampo, il gruppo guidato da Edvard Moser e May-Britt Moser, già *visiting fellow* nel laboratorio di O'Keefe, scoprirono neuroni molto simili alle cellule di posizione. Anche queste cellule scaricavano quando l'animale si trovava in posizioni specifiche. Ma, a differenza delle cellule di posizione, ciascuna di queste cellule appena scoperte manifestava il picco di attività con regolarità in molteplici posizioni. Quando erano abbinati alla posizione dell'animale, gli schemi di attività di queste *grid cell*, o cellule griglia, assumevano l'aspetto di triangoli equilateri molto regolari. Come un'unità di misura spaziale, queste cellule scaricavano quando un animale attraversava i vertici dei triangoli. La scoperta di questi tipi cellulari suscitò entusiasmo, per via del quadro emergente di come il cervello controlla la navigazione. Le cellule di posizione e le cellule griglia offrivano un mezzo per localizzare se stessi nello spazio e per determinare distanza e direzione. Questi strumenti di navigazione sono essenziali per costruire le mappe mentali. Per inciso, nel 2014 O'Keefe e i coniugi Moser ricevettero il premio Nobel per la medicina proprio per i loro studi su cellule di posizione e cellule griglia.

Un'ampia varietà di informazioni è utile per creare una mappa del genere, e il sistema ippocampo-entorinale ne codifica buona parte. Scoprire la posizione di un obiettivo fisico è un esempio: mentre un animale naviga verso di esso, alcuni neuroni dell'ippocampo scaricano in base alla direzione e alla distanza per raggiungerlo. Le cellule aumentano la propria frequenza di scarica quando l'animale si avvicina all'obiettivo.

Ora anche altre cellule rientrano nel quadro. Una popolazione specifica di cellule «della ricompensa» codifica posizioni di ricompensa in ambienti differenti, e così fornisce il segnale per guidare la navigazione dell'animale (immaginate una «X» che evidenzi il punto del tesoro sulla mappa di un pirata). Altre cellule rilevano la velocità e la direzione, agendo così da tachimetri e da bussole che calcolano il progresso dell'animale mentre si sposta attraverso l'ambiente. Cellule specifiche, che segnalano le posizioni di punti di riferimento nell'ambiente circostante, servono da riferimento per correggere errori nella traiettoria dell'animale. Una mappa deve avere anche dei confini: cellule che scaricano più intensamente quando l'animale si avvicina al perimetro della mappa.

IN BREVE

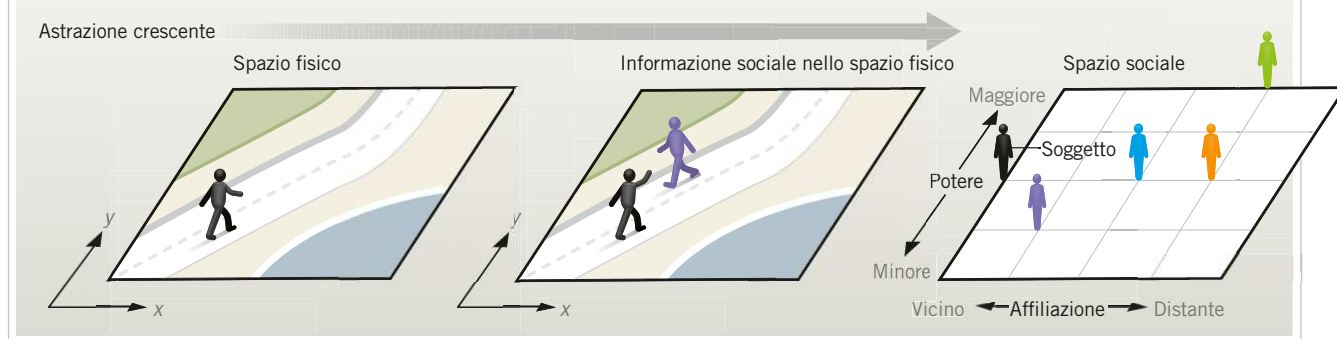
Come fanno gli animali, dai topi all'uomo, a intuire le scorciatoie spostandosi da un luogo a un altro? Gli scienziati hanno scoperto la presenza di mappe mentali nel cervello che aiutano a raffigurarsi i percorsi migliori a partire da un modello interiorizzato dell'ambiente.

Lo spazio fisico non è l'unica cosa che viene tracciata nell'attività cerebrale di creazione di mappe. Modelli cognitivi dell'ambiente potrebbero essere essenziali in processi mentali come la memoria e l'immaginazione, nelle inferenze e nel ragionamento astratto.

Più interessanti sono le prove emergenti che le mappe siano implicate nel rilevare la dinamica delle relazioni sociali, vale a dire quanto sono distanti, oppure vicini, gli individui tra loro e qual è la loro posizione nelle gerarchie di gruppo.

Dal fisico all'astratto

Le mappe semplificano il mondo riducendo una quantità straripante di dati sensoriali e cognitivi in un formato utilizzabile per navigare nello spazio fisico, suggerendo scorciatoie e deviazioni per arrivare prima a destinazione. L'organizzazione di queste mappe – costruite dall'attività di cellule specializzate nel rilevare lo spazio e il tempo – varia nel grado di astrazione di ciò che rappresentano: dal riconoscimento di un altro individuo lungo il percorso fino a uno spazio complesso che denota potere sociale e vicinanza agli altri.

Fonte: "Navigating Social Space," By Matthew Schafer and Daniela Schiller, In Neuron, vol. 100; October 24, 2018

Quanto all'uomo, il significato di una simile abbondanza di tipi cellulari sembra chiaro: il cervello ha la responsabilità di conoscere la posizione di casa o del lavoro, dei muri e dei vicoli ciechi, del negozio preferito o del supermercato all'angolo. È ancora un mistero come queste informazioni siano elaborate in una mappa coerente. Ma queste cellule sembrano fornire l'elenco di elementi di una cartografia neurale. Tuttavia il sistema ippocampo-entorinale è più di un disegnatore di mappe, e le mappe sono più di un modo per localizzare se stessi nello spazio: usandole, avviene una pianificazione attiva.

Quando raggiunge uno snodo in un labirinto che gli è familiare, un topo farà una pausa mentre si attivano sequenze di scarica di cellule di posizione correlate a opzioni differenti: come se l'animale stesse considerando le scelte. L'uomo impiega processi simili. Ricerche su volontari che navigavano in ambienti virtuali mentre il loro cervello era osservato con la risonanza magnetica funzionale hanno rivelato che l'ippocampo si attiva in modo coerente con la pianificazione spaziale: valutare e pianificare percorsi.

La pianificazione avviene anche nel sonno. Sequenze di attività delle cellule di posizione si riattivano nel sonno per riprodurre il passato o per simulare il futuro. Senza la capacità di simulare nuovi comportamenti dovremmo esplorare molteplici alternative nel mondo reale prima di decidere quale azione intraprendere. Saremmo degli empiristi permanenti, capaci di agire soltanto per osservazione diretta. Invece, le simulazioni offline ci permettono di immaginare possibilità senza sperimentarle direttamente.

Viaggio nel tempo mentale

Tempo e spazio sono strettamente legati. È difficile parlare del tempo senza usare una metafora spaziale: il tempo «scorre» mentre lo «attraversiamo»; guardiamo «in avanti» al futuro e «indietro» al passato. Lo stesso sistema ippocampo-entorinale registra il movimento nel tempo. Ricerche svolte soprattutto nel laboratorio di Howard Eichenbaum, all'Università di Boston, hanno rivelato neuroni nel sistema ippocampo-entorinale che codificano il decorso temporale della esperienza di un animale. Le cellule del tempo scaricano in momenti successivi, ma non segnano il tempo in modo semplice, come un orologio; segnano invece il contesto temporale, allungando o comprimendo la durata delle proprie scariche se, per esempio, varia la lunghezza di un compito. Alcune cellule del tempo codificano anche lo spazio. In effetti, nel cervello lo spazio fisico e quello temporale potrebbero essere legati.

La scoperta dell'importanza di queste aree cerebrali dedicate allo spazio e al tempo non è stata una completa sorpresa: da tempo gli psicologi sospettavano che le cose stessero così.

Nel 1953 Henry Molaison fu sottoposto a resezione bilaterale dell'ippocampo, per ridurre gli attacchi epilettici estremi che avevano sconvolto la sua vita. L'intervento represse con successo gli attacchi, ma – conosciuto per decenni solo dalle iniziali H.M. – diventò uno dei casi più celebri nella storia delle neuroscienze.

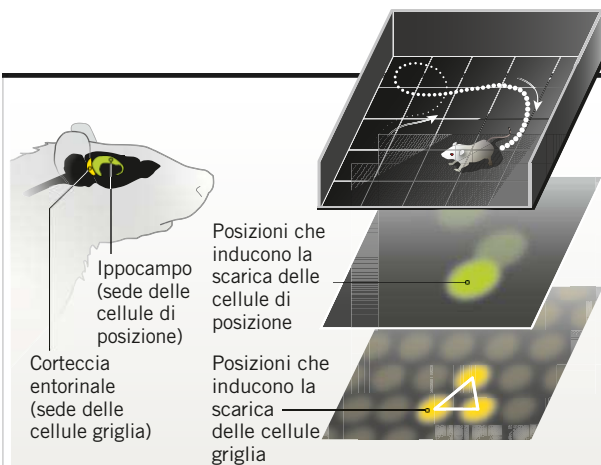
Ricordava buona parte delle esperienze risalenti a prima dell'intervento: persone che conosceva e ricordi culturali e politici. Ma dopo l'intervento la sua capacità di formare quei ricordi espliciti fu pressoché nulla. Tuttavia, alcune forme di apprendimento e di memoria rimasero intatte: poteva imparare ancora alcune nuove abilità, con un esercizio sufficiente. I suoi ricordi di persone, fatti ed eventi nuovi svanivano invece immediatamente.

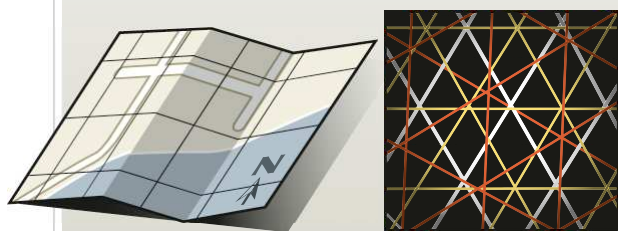
Osservando Molaison, i neuroscienziati scoprirono che l'ippocampo era essenziale per formare i ricordi episodici che registrano fatti ed eventi. Fu un'esplosione di ricerche sul ruolo dell'ippocampo nella memoria episodica, per lo più in parallelo a studi sulle sue funzioni di mappa.

Le scoperte sui ruoli dell'ippocampo e della corteccia entorinale nella navigazione spaziale e nella memoria episodica furono significative per almeno un paio di ragioni. Gli studi sulla navigazione spaziale nei roditori segnarono la prima volta in cui una funzione cognitiva di ordine superiore – che andava oltre i processi sensoriali elementari – corrispondeva a chiari correlati neurali. H.M. ci mostrò che esistevano molteplici tipi di memoria alimentati da sistemi neurali almeno in parte differenti, e che l'ippocampo aveva un ruolo centrale nella formazione e nell'archiviazione di nuovi ricordi episodici.

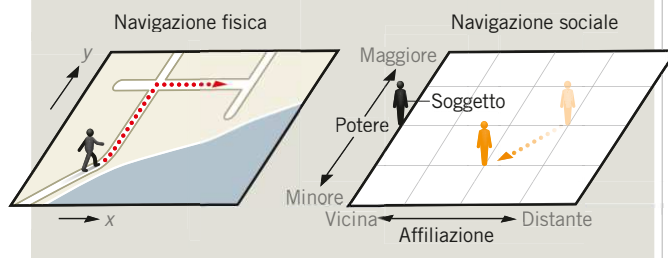
Queste scoperte suggerivano che i meccanismi di navigazione spaziale e temporale fossero alla base della memoria episodica. Questa sintesi è spiegata forse meglio dal costrutto teorico che Tolman aveva proposto decenni prima: la memoria episodica e anche la navigazione spaziale rifletterebbero la formazione e l'uso di mappe cognitive da parte del cervello.

La cartografia cognitiva è fisica e sociale

Il cervello forma l'idea di amico o di nemico unendo diverse caratteristiche sociali da ricordi che localizzano la propria posizione. Secondo quanto suggeriscono le ricerche, queste memorie possono essere poi usate per collocare una persona in una gerarchia sociale che evidenzia, per esempio, dove si trova in relazione ad altri.

Cellule di posizione e cellule griglia

Le cellule di posizione individuano le posizioni. Ciascuna cellula scarica quando si raggiunge un particolare punto su una mappa mentale. Una cellula griglia si attiva quando un animale attraversa i vertici di triangoli sovrapposti a una mappa mentale. Lo schema di attivazione dei triangoli aiuta gli animali a calcolare direzione e distanza percorsa lungo un tragitto.

Il salto alle mappe sociali

All'angolo svolta a destra e prosegui fino a destinazione. Costruire una mappa dell'ambiente fisico è compito delle cellule di posizione e delle cellule griglia. Ma il cervello potrebbe usare queste cellule anche per costruire mappe dell'ambiente sociale: localizzando un conoscente che si avvicina ma perde potere in una relazione.

Fonti: *Scientific Background: The Brain's Navigational Place and Grid Cell System*, di Ole Kiehn e Hans Forssberg, con illustrazioni di Mattias Karlen. Nobelprize.org; *Navigating Social Space*," di Matthew Schafer e Daniela Schiller, in «Neuron», Vol. 100, 24 ottobre 2018

Le mappe non sono ritratti accurati del mondo in tutta la sua complessità. Piuttosto, sono rappresentazioni di relazioni, vale a dire distanze e direzioni tra posizioni, e tra ciò che esiste in quelle posizioni. Le mappe riducono una quantità vertiginosa di informazioni del mondo reale a un modello semplice, di facile lettura, utile per una navigazione efficace e flessibile.

I tipi cellulari citati in precedenza (cellule di posizione, cellule griglia, cellule dei confini) cucirebbero insieme questi elementi correlati in una mappa mentale che poi altre regioni cerebrali possono leggere per guidare la «navigazione», che sfocerà in una presa di decisioni adattativa. La mappatura permette di inferire relazioni, persino quando non sono state sperimentate. Permette anche alle scorciatoie mentali di andare oltre l'ambito dei domini spaziale e temporale. In effetti, il ragionamento usando concetti astratti potrebbe dipendere da alcuni di questi stessi fondamenti neurali.

In un esempio di questa nuova linea di indagini, Alexandra Constantinescu, Jill O'Reilly e Timothy Behrens, dell'Università di Oxford, hanno chiesto a volontari di imparare associazioni di simboli differenti con disegni di uccelli stilizzati, con varie lunghezze del collo e delle zampe. Un uccello dal collo lungo ma dalle zampe corte, per esempio, potrebbe essere collegato all'immagine di una campana, mentre un uccello con un collo corto e zampe lunghe a un orsacchiotto di peluche. Questi collegamenti hanno creato uno spazio di associazioni bidimensionale. Benché le neuroimmagini con la risonanza magnetica siano troppo approssimative per rivelare le cellule a griglia nel cervello umano, l'acquisizione di immagini durante il test ha rilevato comunque uno schema di attivazione a griglia nella corteccia entorinale.

Questi risultati si aggiungono a studi precedenti di Christian Doeller, del Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften di Lipsia, e di Neil Burgess, dello University College di Londra, che avevano rivelato per primi una rappresentazione a griglia entorinale in persone che navigavano in un labirinto virtuale. Per le relazioni sia fisiche che astratte l'organizzazione a griglia è molto efficiente: rende più prevedibili i collegamenti di luoghi o di concetti, aumentando la rapidità delle inferenze su queste relazioni. Come per lo spazio fisico, questa organizzazione delle informazioni permette di inferire scorciatoie: relazioni tra idee o forse analogie, stereotipi e persino alcuni aspetti della creatività potrebbero dipendere da tali inferenze.

Mappe di persone

La progressione dal mondo fisico a quello astratto si ripercuote sul modo in cui il cervello rappresenta le relazioni sociali. Frammenti vari di conoscenze su un'altra persona sono distillati nel concetto di quell'individuo. Quando vediamo una fotografia di qualcuno, oppure udiamo o leggiamo il suo nome, si attivano le stesse cellule ippocampali, indipendentemente dai dettagli sensoriali dello stimolo, come il celebre «neurone di Jennifer Aniston» descritto da Itzhak Fried e colleghi dell'Università della California a Los Angeles. Queste cellule ippocampali sono preposte a rappresentare concetti di individui specifici.

Altre cellule ippocampali rilevano la posizione fisica di altre persone e sono dette *social place cell*, cellule di posizione sociale. In un esperimento di David Omer, della Hebrew University di Gerusalemme, di Nachum Ulanosky, del Weizmann Institute of Science a Rehovot, sempre in Israele, e colleghi, alcuni pipistrelli osservavano loro simili che navigavano in un semplice labirinto per raggiungere un premio. Il compito di un pipistrello osservato-

re era soltanto guardare e imparare da un pipistrello esploratore. Ciò gli avrebbe poi permesso di navigare nello stesso percorso per ottenere lo stesso premio. Quando il pipistrello osservatore guardava, scaricavano le cellule ippocampali corrispondenti alla posizione dell'altro suo simile.

Circuiti neurali inclusi in specifiche sottoregioni dell'ippocampo (in particolare le aree CA1 e CA2) contribuiscono a queste memorie sociali. La stimolazione artificiale o la disattivazione di queste aree ippocampali aumenta, oppure riduce, la capacità di un animale di riconoscere altri animali. Nell'uomo, spesso un danno ippocampale risparmia la memoria di specifici volti individuali, ma si perde la relazione tra questo identificatore essenziale di un'altra persona e il suo comportamento. Questa osservazione suggerisce che l'ippocampo non si limiti a registrare un volto o qualche altro dettaglio della persona, ma che leghi piuttosto tra loro caratteristiche sociali diverse.

L'attività dell'ippocampo rileva anche gerarchie sociali: le richieste del capo e di un collega, per esempio, potrebbero essere valutate in modo differente e attribuire status sociali differenti. Le metafore che illustrano le dimensioni spaziali di una gerarchia sono comuni: una persona potrebbe cercare di accrescere il proprio status per «salire nella scala sociale» o per «guardare dall'alto in basso» qualcuno che sta sotto. Sono essenziali anche altri fattori. Il grado di parentela biologica, obiettivi comuni di gruppo, la storia di favori e di torti memorizzati: determinano tutti la prossimità o la distanza sociale. Le relazioni umane si possono immaginare come coordinate geometriche definite dalle dimensioni di gerarchia e di affiliazione.

I risultati dei nostri studi suggeriscono che l'ippocampo organizzi anche l'informazione sociale in forma di mappa

Negli ultimi anni abbiamo esplorato queste idee nel nostro laboratorio. I nostri risultati suggeriscono che, come fa già per altri spazi, l'ippocampo organizzi l'informazione sociale in forma di mappa. Per verificare questa ipotesi abbiamo introdotto alcuni volontari in un gioco di ruolo, in cui interagivano con dei cartoni animati e prendevano decisioni mentre il loro cervello era sottoposto a scansione.

Nel gioco, i partecipanti si erano appena trasferiti in una nuova città e dovevano interagire con i personaggi immaginari per procurarsi un lavoro e un posto dove stare. I partecipanti prendevano decisioni su come interagire con un particolare personaggio. I giocatori potevano richiedere che altri elargissero favori per dimostrare il loro potere, o potevano sottostare a richieste che venivano loro fatte. In un'interazione successiva potevano decidere se compiere o no un gesto di attaccamento, come dare un abbraccio oppure rimanere a distanza.

Usando queste decisioni, abbiamo rappresentato ciascun personaggio in forma di coordinate su una mappa che illustrava il loro movimento lungo le dimensioni del potere e dell'affiliazione. Per ciascuna interazione abbiamo tracciato una linea, o vettore, dal partecipante al personaggio. In questo modo abbiamo mappato il grafico dell'evoluzione delle relazioni come traiettorie nello spazio sociale e calcolato le informazioni su angoli e lunghezze dei vettori sociali.

Abbiamo cercato i segnali neurali che rilevavano queste informazioni correlando l'attività cerebrale di un partecipante all'angolo e alla lunghezza dei vettori per ciascuna decisione. L'attività dell'ippocampo rilevava l'angolo tra i personaggi e il partecipante. Il grado in cui quella attività coglieva queste coordinate sociali rifletteva anche le abilità sociali dei partecipanti, secondo come le avevano riferivate. Questi risultati suggeriscono che l'ippocampo rilevi la dinamica sociale, proprio come le posizioni fisiche, codificando relazioni tra punti nello spazio multidimensionale. In effetti, può darsi che il sistema ippocampo-entorinale svolga un ruolo lungo qualsiasi dimensione arbitraria in cui possiamo ordinare le informazioni, fisiche o astratte che siano.

Molte domande sulle mappe sociali del cervello sono ancora senza risposta. Come interagisce questo sistema con altre regioni cerebrali? Per esempio nel nostro studio con il gioco di ruolo abbiamo scoperto che la corteccia cingolata posteriore, una regione coinvolta anche nella rappresentazione dell'informazione spaziale, rilevava la lunghezza di vettori sociali: funzionava in sostanza da metro di «distanza sociale». Inoltre, abbiamo scoperto un segnale a griglia in regioni cerebrali connesse con il sistema ippocampo-entorinale, e che con questo si coattivano. Ciò suggerisce che formino una rete di regioni cerebrali che hanno proprietà funzionali comuni.

Via via che le ricerche si accumulano, sorgono anche domande importanti in ambito clinico. Processi di mappatura difettosi possono spiegare un disturbo psichiatrico? Un'altra possibilità è che le idee ricavate da questa architettura cerebrale possano ispirare lo sviluppo dell'intelligenza artificiale. Modelli interni del mondo ben organizzati potrebbero essere il segreto per costruire macchine più intelligenti.

Che lo stesso sistema di mappatura possa fondare la navigazione nello spazio e nel tempo, il ragionamento, la memoria e l'immaginazione, e persino la dinamica sociale, suggerisce che è questa nostra capacità di costruire modelli del mondo a permetterci di apprendere in modo così adattativo. Il mondo è pieno di relazioni a un tempo fisiche e astratte: mappe di strade urbane e mappe mentali di concetti correlati ci aiutano a dare un senso al mondo, estraendo, organizzando e archiviando informazioni correlate: un nuovo ristorante in una strada familiare può essere collocato facilmente dentro una mappa spaziale preesistente; nuovi concetti possono essere correlati a vecchie teorie; e un nuovo conoscente può ridisegnare il nostro spazio sociale.

Le mappe ci permettono di simulare possibilità e di fare previsioni, il tutto nel sicuro della nostra mente. Le scorciatoie mentali che possiamo evocare così facilmente potrebbero fondarsi sullo stesso sistema che ci permette di immaginare una deviazione per aggirare un ingorgo di traffico. Abbiamo appena cominciato a scoprire le molteplici proprietà e capacità di questo sistema. Le mappe mentali non si limitano ad aiutarci a trovare scorciatoie nello spazio fisico. Ci permettono di orientarci nella vita. ■

PER APPROFONDIRE

Social Place-Cells in the Bat Hippocampus. Omer D. B. e altri, in «Science», Vol. 359, pp. 218-224, 12 gennaio 2018.

Navigating Social Space. Schafer M. e Schiller D., in «Neuron», Vol. 100, n. 2, pp. 476-489, 24 ottobre 2018.

What Is a Cognitive Map? Organizing Knowledge for Flexible Behavior. Behrens T.E.J. e altri, in «Neuron», Vol. 100, n. 2, pp. 490-509, 24 ottobre 2018.

Navigating Cognition: Spatial Codes for Human Thinking. Bellmund J.L.S. e altri, in «Science», Vol. 362, articolo n. eaat6766, 9 novembre 2018.

COSMOLOGIA

Una crisi cosmica

Due misurazioni della velocità a cui si espande l'universo danno risultati diversi, ma non possono essere entrambe corrette. C'è qualcosa che non va, ma che cosa?

di Richard Panek

Illustrazione di Mark Ross Studios

Richard Panek è autore di *Il 4% dell'universo* (Codice, 2012), vincitore di una Guggenheim Fellowship in Science Writing. Il suo libro più recente è *Il mistero sotto i nostri piedi* (Raffaello Cortina, 2020).

Verso la fine del Novecento, il modello cosmologico standard sembrava completo. Pieno di misteri e ricco di aree fertili per ulteriori ricerche, certo, ma nel complesso pareva solido: l'universo è formato per circa due terzi da energia oscura (qualcosa di misterioso che accelera l'espansione dell'universo), forse per un quarto da materia oscura (qualcosa di misterioso che determina l'evoluzione della struttura nell'universo) e per il 4 o 5 per cento da materia «ordinaria» (quella di cui siamo fatti noi, i pianeti, le stelle, le galassie e tutti gli altri oggetti che, fino a pochi decenni fa, credevamo costituissero l'universo nella sua interezza). Tutto tornava.

Un attimo, non corriamo troppo. Letteralmente, perché il problema è proprio nella velocità a cui si muove tutto.

Negli ultimi anni è emersa una differenza tra due modi di misurare il tasso di espansione dell'universo, un valore chiamato costante di Hubble (H_0). Le misurazioni che iniziano dall'universo odierno e procedono all'indietro verso fasi sempre più antiche hanno trovato in modo coerente un certo valore per H_0. Le misurazioni che partono dalle prime fasi dell'universo e procedono in avanti, invece, prevedono coerentemente un valore diverso, che suggerisce che l'universo si stia espandendo più velocemente di quanto pensassimo.

La differenza è matematicamente sottile ma, come succede spesso per le sottili differenze matematiche ingigantite dalla scala spazio-temporale dell'universo, significativa a livello cosmico. Conoscere il vero tasso di espansione dell'universo permette ai cosmologi di estrapolare all'indietro nel tempo per determinare l'età dell'universo, e di estrapolare in avanti per capire quando, secondo la teoria attuale, lo spazio tra le galassie sarà diventato così vasto che il cosmo sembrerà una distesa vuota oltre i nostri immediati dintorni. Un valore corretto di H_0 potrebbe anche aiutare a chiarire la natura dell'energia oscura che alimenta l'accelerazione.

Finora le misurazioni dell'universo primordiale che procedono in avanti prevedono un certo valore per H_0, mentre le misurazioni dall'universo recente all'indietro ne rivelano un altro. Questo tipo di situazione non è raro in ambito scientifico; di solito scompare a un esame più attento, e negli ultimi dieci anni i cosmologi non se ne sono crucciati proprio supponendo che sarebbe scomparsa in questo modo. Invece la differenza è peggiorata, anno dopo anno, via via che ogni serie di misurazioni diventava sempre più intrattabile. Adesso è emersa un'opinione condivisa sul problema.

Nessuno dice che l'intero modello cosmologico standard sia sbagliato. Ma c'è qualcosa che non va, forse nelle osservazioni o forse nell'interpretazione delle osservazioni, sebbene entrambe le possibilità siano improbabili. Rimane un'ultima opzione, altrettanto improbabile ma sempre meno impensabile: che qualcosa non vada nel modello cosmologico stesso.

Un programma in due numeri

Per la stragrande parte della storia umana lo «studio» delle nostre origini cosmiche era costituito solo dal mito, con le sue variazioni sul tema del «in principio». Nel 1925 l'astronomo statunitense Edwin Hubble lo portò verso l'empirismo, quando annunciò di aver risolto il mistero secolare dell'identità delle chiazze sfumate in cielo che gli astronomi chiamavano «nebulose». Le nebulose erano formazioni gassose che risiedevano nella volta stellata? In tal caso forse questa volta celeste, che si estendeva fin dove i più

IN BREVE

Gli astronomi hanno ripetutamente calcolato il tasso di espansione dell'universo – la costante di Hubble – con due tecniche diverse. Queste misurazioni hanno portato a un conflitto che è apparentemente insanabile.

Un metodo, che si basa su stelle e supernove dell'universo relativamente recente, arriva a un valore. L'altra strategia, che sfrutta il bagliore residuo del big bang, ne trova un altro.

La differenza è forse dovuta a problemi sperimentali, tuttavia nessun ricercatore sa quali possano essere. Un'altra possibilità è che il conflitto tra i valori dei due metodi derivi da fenomeni ancora non scoperti: una «nuova fisica».

potenti telescopi potevano scrutare, era l'universo nella sua interezza. Oppure le nebulose erano «universi isola» a sé stanti? Hubble aveva scoperto che almeno una nebulosa lo era: quella che oggi chiamiamo galassia di Andromeda.

Inoltre, osservando la luce proveniente da altre nebulose, Hubble scoprì che le lunghezze d'onda si erano allungate verso l'estremità rossa dello spettro visibile, il che faceva pensare che ognuna delle sorgenti di questa luce si stesse allontanando dalla Terra. Per inciso, la velocità della luce rimane costante, quello che cambia è la distanza tra le creste successive delle onde, ed è questa lunghezza d'onda a determinare il colore.

Nel 1927 il fisico e sacerdote belga Georges Lemaître notò una regolarità: maggiore era la distanza di una galassia, maggiore era il suo spostamento verso il rosso. In altre parole, più era lontana, più velocemente si allontanava. Nel 1929 Hubble raggiunse indipendentemente la stessa conclusione: l'universo si sta espandendo.

Espandendo rispetto a che cosa? Se immaginiamo di invertire l'espansione del cosmo, troviamo un punto di partenza, una specie di luogo di nascita. Quasi subito alcuni teorici ipotizzarono una sorta di esplosione di spazio e tempo, un fenomeno che in seguito acquisì il nome (inizialmente spregiativo) di «big bang». L'idea sembrava assurda e per decenni, in assenza di prove empiriche, la maggior parte degli astronomi poté permettersi di ignorarla. Tutto cambiò nel 1965, quando su «Astrophysical Journal» furono pubblicati insieme due articoli. Uno, di quattro fisici della Princeton University, prevedeva la temperatura attuale di un universo emerso da una palla di fuoco primordiale. L'altro, di due astronomi dei Bell Labs, riportava la misurazione di questa temperatura.

Nessuno dice che l'intero modello cosmologico standard sia sbagliato. Ma c'è qualcosa che non va

L'antenna radio dei Bell Labs aveva registrato uno strato di radiazioni da tutte le direzioni del cielo, quello che poi sarebbe stato chiamato fondo cosmico a microonde (CMB). La temperatura calcolata a partire dal CMB, circa tre gradi sopra lo zero assoluto, non corrispondeva esattamente alla previsione formulata dallo studio di Princeton, ma per essere un primo tentativo ci era andato abbastanza vicino da portare consenso all'ipotesi del big bang. Nel 1970 Allan R. Sandage, a suo tempo *protégé* di Hubble, pubblicò su «Physics Today» un saggio influente che di fatto fissò il nuovo programma di ricerca per i decenni a venire: *Cosmology: A Search for Two Numbers* (Cosmologia: una ricerca di due numeri). Un numero, diceva Sandage, era il tasso di espansione dell'universo: la costante di Hubble. Il secondo era la velocità a cui questa espansione stava rallentando, il parametro di decelerazione.

Nascita di una crisi

I ricercatori fissarono prima un valore per il secondo numero. Alla fine degli anni ottanta due gruppi iniziarono a misurare la decelerazione lavorando con un presupposto comune e uno strumento comune. Il presupposto era che in un universo in espansione pieno di materia che interagisce gravitazionalmente con tutto il resto della materia, ogni cosa ne attrae ogni altra, l'espansione doveva rallentare. Lo strumento erano le supernove di tipo Ia, esplosioni stellari che secondo gli astronomi potevano servire come candele standard, cioè fonti di luce che non variano da un esemplare all'altro e la cui luminosità ne indica la distanza relativa. (Una lampadina da 60 watt appare sempre più fioca via via che ce ne allontaniamo, ma se sappiamo che è appunto una lampadina da 60 watt possiamo dedurne quanto è lontana da noi.) Se l'espansione sta rallentando, ragionarono gli astronomi, le supernove a enorme distanza dalla Terra sarebbero più vicine, e quindi più luminose, che se l'universo stesse crescendo a un ritmo costante.

Invece quello che scoprirono indipendentemente entrambi i gruppi fu che le supernove più distanti erano più fioche del previsto e quindi più lontane. Nel 1998 annunciarono la loro conclusione: l'espansione dell'universo non sta rallentando, sta accelerando. La causa di questa accelerazione fu chiamata «energia oscura», un nome da usare come «cartello segnaletico» fino a quando qualcuno non capirà di che cosa si tratta.

Presto arrivò un valore anche per il primo numero di Sandage, la costante di Hubble. Per decenni il numero era stato oggetto di discussione tra gli astronomi. Sandage stesso aveva affermato che H_0 dovesse valere circa 50 (il tasso di espansione espresso in chilometri per secondo per 3,26 milioni di anni luce), un valore che avrebbe fissato l'età dell'universo a circa 20 miliardi di anni. Altri astronomi preferivano H_0 vicino a 100, cioè un'età di circa 10 miliardi di anni. La differenza era imbarazzante: anche una scienza appena nata dovrebbe essere in grado di limitare una costante fondamentale entro un fattore due.

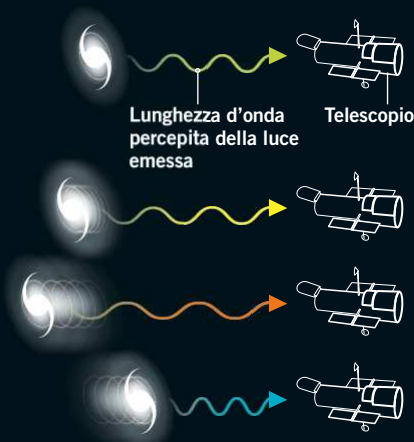
Nel 2001 l'Hubble Space Telescope Key Project ha completato la prima misurazione affidabile della costante di Hubble. In questo caso le candele standard erano le variabili Cefeidi, stelle che diventano più luminose o più fioche con una regolarità che corrisponde alla loro luminosità assoluta (il corrispondente dei 60 watt, per così dire). Il Key Project ha portato a un valore che è a metà strada tra i due precedenti: 72 ± 8.

La successiva ricerca puramente astronomica della costante è stata effettuata da SH0ES (Supernovae, H_0, for the Equation of State of Dark Energy), un gruppo guidato da Adam G. Riess, che nel 2011 è stato tra i vincitori del premio Nobel per la fisica, per il suo ruolo nelle scoperta dell'accelerazione nel 1998. Questa volta le candele standard erano sia Cefeidi sia supernove di tipo Ia, e tra queste ultime c'erano alcune supernove tra le più lontane mai osservate. Il risultato iniziale, nel 2005, è stato di 73 ± 4, quasi identico a quello del Key Project ma con un margine di errore inferiore. Da allora SH0ES ha fornito aggiornamenti regolari, tutti nello stesso intervallo e con errori sempre più piccoli. Il più recente, nel 2019, è stato di $74{,}03 \pm 1{,}42$.

Tutte queste misurazioni di H_0 fanno uso dell'approccio tradizionale dell'astronomia: si parte dal qui e ora, quello che i cosmologi chiamano il tardo universo, e si scruta sempre più lontano nello spazio, il che equivale (dato che la velocità della luce è finita) a scrutare sempre più indietro nel tempo, fino a dove si riesce a vedere. Nell'ultima ventina d'anni, tuttavia, alcuni ricercatori hanno anche iniziato a usare l'approccio opposto. Cominciano dal punto più lontano possibile e procedono verso il presente. Il punto di separazione, il confine tra quello che possiamo e quello che non possiamo vedere, tra l'universo primordiale e quello più recente, è lo stesso CMB che gli astronomi osservarono per la prima volta negli anni sessanta grazie all'antenna radio dei Bell Labs.

Il CMB è una radiazione residua risalente al periodo in cui l'universo, quando aveva appena 379.000 anni, si era raffreddato abbastanza da permettere la formazione degli atomi di idrogeno, dis-

Un conflitto al centro della cosmologia

Il valore della costante di Hubble (H_0), che misura il tasso di espansione dell'universo, è un numero fondamentale e controverso per tutta la cosmologia. In contrasto con tutte le aspettative, le stime di H_0 dall'universo primordiale, cioè appena successivo al big bang, e dall'universo più recente, ovvero più vicino ai giorni nostri, non concordano. La differenza può essere il risultato di errori di valutazione in una delle due stime oppure potrebbe riflettere lacune fondamentali in quello che sappiamo attualmente dell'universo.

MISURARE LA VELOCITÀ DELLE GALASSIE
L'approccio classico al calcolo di H_0 nell'universo recente richiede la misurazione sia delle velocità sia delle distanze delle galassie lontane. La stima delle velocità si basa sul fenomeno dello spostamento verso il rosso (il *redshift*) cosmologico: lo stiramento della lunghezza d'onda, ovvero un arrossamento, della luce proveniente da oggetti che si allontanano da noi mentre il cosmo si espande. Più grande è il redshift, più velocemente un oggetto si sta allontanando.

DAL PUNTO DI VISTA DELL'UNIVERSO PRIMORDIALE, H_0 si può misurare anche usando il fondo cosmico a microonde (CMB), il bagliore residuo del big bang, che occupa tutto il cielo, risalente a quando l'universo era solo una distesa di plasma denso e ribollente, con un'età di appena 379.000 anni. Le onde sonore che riverberavano attraverso questo plasma hanno creato zone con densità di materia maggiore della media e zone con densità minore, che si sono impresse sul CMB come lievi variazioni di temperatura. Studiando dimensioni e altre proprietà di queste variazioni, i cosmologi possono usarle come un «righello standard» rispetto a cui tracciare crescita ed evoluzione successive dell'universo. Questi studi, a loro volta, danno una stima di H_0.

SALIRE LA SCALA DELLE DISTANZE
Stimare le distanze delle galassie remote è molto più difficile che misurarne le velocità tramite lo spostamento verso il rosso.
Gli astronomi che cercano il valore di H_0 nell'universo recente lo fanno risalendo la cosiddetta scala delle distanze cosmiche, in cui si succedono diversi metodi di misurazione per calcolare distanze immani.
In genere le Cefeidi – stelle variabili con una luminosità intrinseca nota – costituiscono il primo gradino della scala e possono dare la distanza delle galassie vicine. Quelle più distanti, invece, richiedono oggetti diversi e più luminosi di cui si conosca la luminosità intrinseca: di solito alcuni tipi di esplosioni stellari dette supernove di tipo Ia.
Gli astronomi calibrano queste due diverse tecniche usando galassie vicine che ospitano sia Cefeidi sia supernove di tipo Ia.

Maggiore precisione nel tempo dei calcoli della costante di Hubble

Metodo della scala delle distanze: dovuta soprattutto all'aumento del numero di misurazioni differenziali

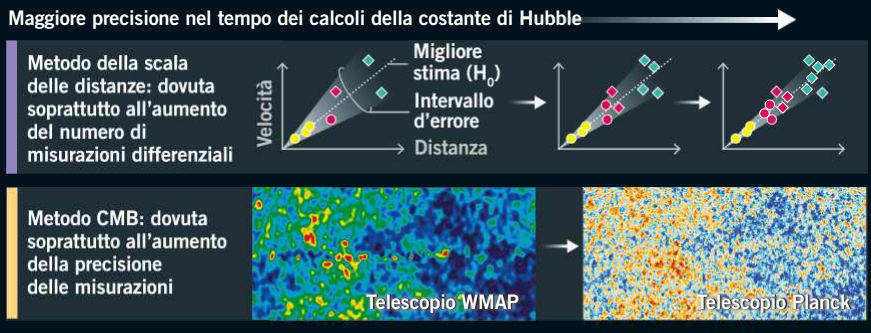
Velocità – Migliore stima (H_0) – Intervallo d'errore – Distanza

Metodo CMB: dovuta soprattutto all'aumento della precisione delle misurazioni

Telescopio WMAP → Telescopio Planck

RISULTATI DIVERGENTI
Il valore di H_0 per l'universo primordiale basato sul CMB è 67 (in chilometri per secondo per 3,26 milioni di anni luce). Il valore per l'universo recente basato sulle Cefeidi è 74. Una nuova alternativa alle Cefeidi, le stelle giganti rosse che si accendono con una luminosità intrinseca nota, ha solo complicato la tensione. Indicavano un H_0 di circa 70, un valore a metà strada tra gli altri due, senza sovrapposizioni tra gli intervalli di errore.

VERSO UN'UNIONE PIÙ PERFETTA... O UNA NUOVA FISICA
Astronomi e cosmologi sono al lavoro per aumentare la precisione delle rispettive stime di H_0, riducendo progressivamente incertezze e possibili errori nella speranza che i loro risultati possano prima o poi sovrapporsi. Telescopi sempre più potenti scrutano più in profondità il cosmo, misurando Cefeidi sempre più lontane, mentre il satellite Planck mappa il CMB migliorando notevolmente le misurazioni rispetto al suo predecessore, la sonda WMAP. Se però la differenza non scomparirà, potrebbero essere necessarie profonde revisioni dei nostri modelli cosmologici.

Illustrazione di George Retseck (*cono di espansione*) e Jen Christiansen (*schemi*)

ESA e collaborazione PLANCK (*CMB da Planck*); NASA e WMAP Science Team (*dettaglio CMB da WMAP*); fonte: *The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*, di Wendy L. Freedman e altri, in «Astrophysical Journal», Vol. 882, n. 1, 29 agosto 2019 (*grafico risultati divergenti*)

sipando la fitta nebbia di protoni ed elettroni liberi e liberando spazio a sufficienza affinché i fotoni potessero viaggiare per il cosmo. Sebbene la prima immagine del CMB ottenuta dai Bell Labs fosse una distesa uniforme, i teorici ritenevano che, a una risoluzione più elevata, la radiazione di fondo avrebbe rivelato variazioni di temperatura che rappresentavano i semi di densità che si sarebbero evoluti nella struttura dell'universo come la conosciamo: galassie, ammassi di galassie e superammassi di galassie.

Nel 1992 il Cosmic Background Explorer della NASA, la prima sonda spaziale che ha studiato il fondo cosmico a microonde, ha trovato queste variazioni distintive; nel 2003 una sonda spaziale successiva, la Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) della NASA, in collaborazione la Princeton University, ha fornito una risoluzione molto più elevata che ha permesso ai fisici di identificare la dimensione delle onde sonore primitive prodotte dalla materia primordiale. Come ci si può aspettare da onde sonore che hanno viaggiato quasi alla velocità della luce per 379.000 anni, i punti densi nel CMB condividono un raggio comune di circa 379.000 anni luce. E poiché quei punti sono cresciuti portando all'universo che studiamo oggi, i cosmologi possono usare questa dimensione iniziale come «righello standard» con cui misurare la crescita e l'espansione della struttura su larga scala fino ai giorni nostri. Queste misurazioni, a loro volta, rivelano il tasso dell'espansione: la costante di Hubble.

La prima misurazione di H_0 effettuata grazie a WMAP, nel 2003, è stata di 72 ± 5. Perfetto. Il numero corrispondeva esattamente al risultato del Key Project, con l'ulteriore vantaggio di un intervallo d'errore più ristretto. Ulteriori risultati di WMAP sono stati leggermente inferiori: 73 nel 2007, 72 nel 2009, 70 nel 2011. Nessun problema, però: l'errore per le misurazioni SH0ES e WMAP continuava a sovrapporsi nell'intervallo 72-73. Giunti al 2013, tuttavia, i due margini si sfioravano appena. In quel momento il risultato più recente di SH0ES dava una costante di Hubble di 74 ± 2, mentre il risultato finale di WMAP mostrava un valore di 70 ± 2. Ma non c'era ancora da preoccuparsi: i due metodi potevano concordare su 72. Sicuramente i risultati di uno dei approcci avrebbero cominciato a tendere verso quelli dell'altro via via che metodi e tecnologia miglioravano, magari già appena fossero stati disponibili i primi dati dell'osservatorio spaziale Planck, il successore di WMAP realizzato dall'Agenzia spaziale europea.

I dati sono arrivati nel 2014: 67,4 ± 1,4. L'errore non si sovrapponeva più, non ci andava nemmeno vicino. I successivi dati di Planck si sono dimostrati impietosi come quelli di SH0ES. Il valore di Planck per la costante di Hubble è rimasto 67, mentre il margine di errore scendeva a 1 e poi, nel 2018, a una frazione di 1.

«Tensione» è il termine che si usa per una situazione del genere, come nel titolo di un convegno al Kavli Institute for Theoretical Physics (KITP) a Santa Barbara, in California, l'estate scorsa: *Tensions between the Early and the Late Universe* (Tensioni tra l'universo primordiale e quello recente). Il primo oratore è stato Riess, e alla fine del suo intervento si è rivolto a un altro Nobel tra i presenti, David Gross, fisico delle particelle ed ex direttore del KITP, chiedendogli che cosa ne pensasse: abbiamo una «tensione» o abbiamo un «problema»?

Gross ha sottolineato che queste distinzioni sono «arbitrarie», per poi concludere: «Penso che lo possiamo chiamare problema». Venti minuti dopo, alla chiusura delle domande dal pubblico, ha cambiato valutazione. In fisica delle particelle, ha detto, «non lo chiameremmo né tensione né problema, ma piuttosto crisi».

«D'accordo,» ha detto Riess, concludendo la discussione. «Allora sappiate che ci troviamo in una crisi».

Tre possibilità

A differenza di una tensione, che richiede un allentamento, o di un problema, che richiede una soluzione, una crisi richiede qualcosa di più: un ripensamento globale. Ma di che cosa? Chi studia la costante di Hubble vede tre possibilità.

Una è che qualcosa non vada nel modo in cui studiamo l'universo recente. Una «scala delle distanze» cosmiche che si estende sempre più lontano nell'universo è solo robusta quanto i gradini che la formano: le candele standard. Come in ogni osservazione scientifica, gli errori sistematici fanno parte dell'impostazione.

Questa possibilità ha scosso il convegno al KITP. All'incontro, un gruppo diretto da Wendy L. Freedman, astrofisica ora all'Università di Chicago, che era stata ricercatrice principale del Key Project, ha presentato un risultato in controtendenza. Usando un tipo ancora diverso di candela standard – le stelle chiamate giganti rosse che, sul punto di estinguersi, sperimentano un «flash di elio» che ne indica in modo affidabile la luminosità – Freedman e colleghi avevano raggiunto un valore che, come diceva il loro articolo, «si colloca a metà dell'intervallo definito dall'attuale tensione di Hubble»: 69,8 ± 0,8, un risultato che non offre una sovrapposizione rassicurante con i margini di errore di SH0ES o di Planck. Il tempismo con cui è stata presentata la ricerca è sembrato una provocazione ad alcuni dei presenti che si occupavano dell'universo recente. I ricercatori di SH0ES, in particolare, hanno avuto poca opportunità di digerire i dati (cosa che hanno cercato di fare la sera stessa della presentazione a cena), tanto meno di decidere come rispondere.

Se la fonte della tensione non è nelle osservazioni dell'universo, i cosmologi non hanno molta altra scelta se non seguire l'opzione di una nuova fisica

Appena tre settimane dopo, però, hanno reso pubblico un articolo di risposta. Il metodo usato dal gruppo di Freedman «è una candela standard promettente per misurare distanze extragalattiche», esordiscono gli autori diplomaticamente, prima di sviscerare gli errori sistematici che a loro avviso gravano sui risultati del gruppo. L'interpretazione preferita da Riess e colleghi dei dati delle giganti rosse riportava la costante di Hubble a un valore ben all'interno dei confini precedenti: 72,4 ± 1,9.

Freedman dissente con veemenza da questa interpretazione: «È sbagliata», afferma. «Hanno frainteso il metodo, e sì che gliel'abbiamo spiegato in diversi incontri».

All'inizio di ottobre del 2019, in occasione di un altro incontro sulla «tensione», la diatriba ha preso una svolta personale quando Barry Madore, collaboratore e marito di Freedman, ha mostrato in un presentazione la testa di Riess in una ghigliottina. L'immagine faceva parte di una metafora scientifica centrata sul ceppo del boia e in seguito Madore ha detto che mostrare la testa di Riess era uno scherzo. Ma Riess era tra il pubblico, e basti dire che nella successiva pausa caffè si è svolta, su richiesta di molti partecipanti, una discussione sui codici di condotta professionali.

Questi battibecchi fanno ritenere ai fisici delle particelle che il problema sia negli astronomi e negli errori dovuti al metodo della scala delle distanze. Ma anche le osservazioni del CMB e il righello cosmico devono avere il loro potenziale di errori sistematici, no? In linea di principio sì. Ma pochi o nessuno degli astronomi pensano che Planck abbia qualche problema, e i fisici ritengono che abbia raggiunto la soglia di precisione per le osservazioni spaziali del CMB. In altre parole, le misurazioni di Planck del CMB sono probabilmente le migliori che riusciremo mai a ottenere. «I dati sono spettacolari», afferma Nicholas Suntzeff, astronomo della Texas A&M University che ha collaborato con Freedman e con Riess, sebbene non sulla costante di Hubble. «Inoltre le osservazioni indipendenti» del CMB, con il South Pole Telescope e l'Atacama Large Millimeter Array, «mostrano che non ci sono errori».

Se la fonte della tensione di Hubble non è nelle osservazioni dell'universo recente e nemmeno in quelle dell'universo primordiale, allora i cosmologi hanno poca scelta, se non seguire la terza opzione: una «nuova fisica».

Una correzione necessaria

Ormai da quasi un secolo gli scienziati parlano di nuova fisica, cioè di forze o fenomeni che ricadrebbero al di fuori dalla nostra attuale conoscenza dell'universo. Nel 1915 Albert Einstein introdusse la teoria generale della relatività; dieci anni dopo, l'avvento della meccanica quantistica ne compromise la completezza. L'universo del grandissimo (quello che opera secondo le regole della relatività generale) si è rivelato matematicamente incompatibile con l'universo del piccolissimo (quello che opera secondo le regole della meccanica quantistica).

Forse non sarà completo, tuttavia il modello cosmologico standard rimane un esempio da manuale di come funziona la scienza al suo meglio

Per un po' i fisici hanno potuto ignorare il problema, perché nella pratica i due ambiti non si incontravano, ma poi è arrivata la scoperta del CMB, che ha convalidato l'idea che l'universo del grandissimo sia effettivamente emerso dall'universo del piccolissimo, che galassie e ammassi su larga scala che studiamo con l'aiuto della relatività generale siano cresciuti da fluttuazioni quantistiche. La tensione di Hubble nasce direttamente dal tentativo di abbinare questi due tipi di fisica. Le fluttuazioni quantistiche del CMB prevedono che l'universo maturerà con un certo valore della costante di Hubble, mentre le osservazioni effettuate oggi in base alla relatività generale mostrano un altro valore.

Riess paragona la differenza alla crescita di una persona. «Se avete un bambino, ne potete misurare la statura in modo molto preciso quando ha due anni», dice. «E potete poi usare quello che sappiamo su come crescono gli esseri umani, un grafico della crescita, per prevedere a quale statura arriverà». Se tutto va bene, previsione e misurazione finale coincidono. «In questo caso non succede». D'altronde, aggiunge, «non abbiamo un grafico della crescita che dica come crescano di solito gli universi».

E così i cosmologi hanno considerato l'idea rivoluzionaria – ma non del tutto sgradevole – che il modello cosmologico standard non sia completo come pensavano.

Un possibile fattore che influisce sulla nostra comprensione della crescita dell'universo è un'incertezza sul conteggio delle particelle dell'universo. Oggi la maggior parte degli scienziati ha l'età per ricordarsi di un altro divario tra osservazioni e teoria: il «problema dei neutrini solari», una disputa durata decenni sui neutrini elettronici provenienti dal Sole. I teorici ne prevedevano una certa quantità; i rivelatori ne indicavano un'altra. I fisici sospettavano errori sistematici nelle osservazioni; gli astronomi mettevano in dubbio la completezza della teoria. Come per la tensione sulla costante di Hubble, nessuna delle due parti ha ceduto fino alla fine del millennio, quando si è scoperto che i neutrini, inaspettatamente, avevano massa, e i teorici hanno adeguato il modello standard della fisica delle particelle. Adesso un aggiustamento simile, per esempio una nuova varietà di neutrino nell'universo primordiale, potrebbe alterare la distribuzione di massa ed energia quanto basta per giustificare le differenze nelle misurazioni.

Un'altra possibile spiegazione è che l'influenza dell'energia oscura cambi nel corso del tempo: un'alternativa ragionevole, considerando che i cosmologi non sanno come funzioni questa energia, e nemmeno che cosa sia.

«Da qualche parte è necessaria una piccola correzione per far concordare i numeri», afferma Suntzeff. «Questa è fisica nuova, ed entusiasma i cosmologi: una crepa nel muro del modello standard, qualcosa di nuovo su cui lavorare».

Tutti sanno che cosa dovranno fare prossimamente. Gli interessati attenderanno i dati di Gaia, un osservatorio dell'Agenzia spaziale europea che promette, nei prossimi due anni, una precisione senza precedenti nella misurazione delle distanze per oltre un miliardo di stelle della nostra galassia. Se queste misurazioni non corrisponderanno ai valori usati dagli astronomi come primo gradino nella scala delle distanze, forse il problema era veramente in errori sistematici. I teorici continueranno a sfornare interpretazioni alternative dell'universo. Finora, però, non ne hanno trovata nessuna che resista alla verifica della loro comunità ed è qui che, a meno di una sorpresa, dovrà risiedere per ora la tensione, il problema, la crisi: in un universo quasi non scientifico che ospita una costante di Hubble prevista di 67 che smentisce l'osservazione di 74.

Il modello cosmologico standard resta uno dei grandi trionfi scientifici moderni. In mezzo secolo la cosmologia è maturata passando dalle ipotesi alla (quasi) certezza. Forse non è completo come credevano i cosmologi ancora un anno fa, ma rimane un esempio da manuale del modo in cui funziona la scienza al suo meglio: suscita domande, fornisce risposte, suggerisce misteri. ■

PER APPROFONDIRE

Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters. Planck Collaboration, preprint pubblicato il 17 luglio 2018. Disponibile all'indirizzo: **https://arxiv.org/abs/1807.06209.**

Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond LambdaCDM. Riess A.G. e altri, preprint pubblicato il 18 marzo 2019. Disponibile all'indirizzo: **https://arxiv.org/abs/1903.07603.**

The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch. Freedman W.L. e altri, in «Astrophysical Journal», Vol. 882, n. 1, articolo n. 34, settembre 2019.

L'enigma dell'energia oscura. Riess A.G. e Livio M., in «Le Scienze» n. 573, maggio 2016.

COSMOLOGIA

Viviamo in un universo curvo?

La maggior parte dei cosmologi ritiene che l'universo sia piatto, ma nuove analisi dei dati sulla struttura del cosmo mettono in dubbio questa visione

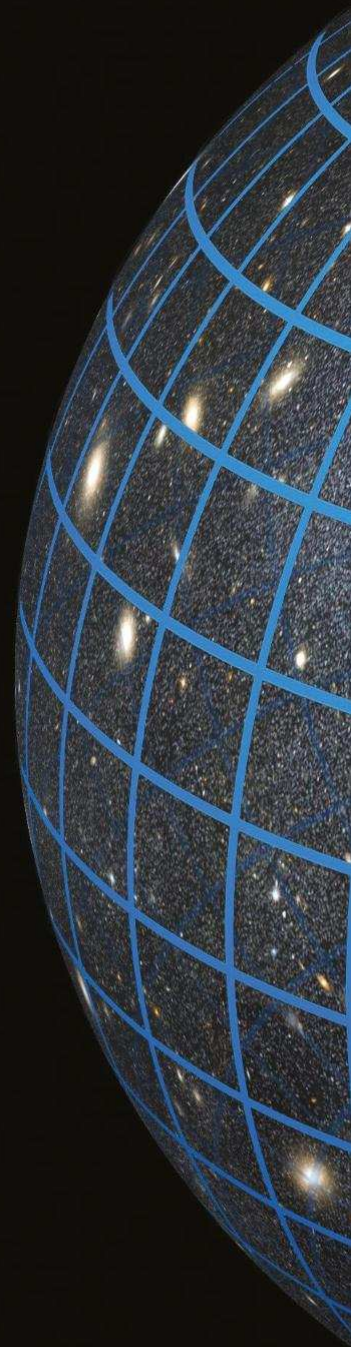
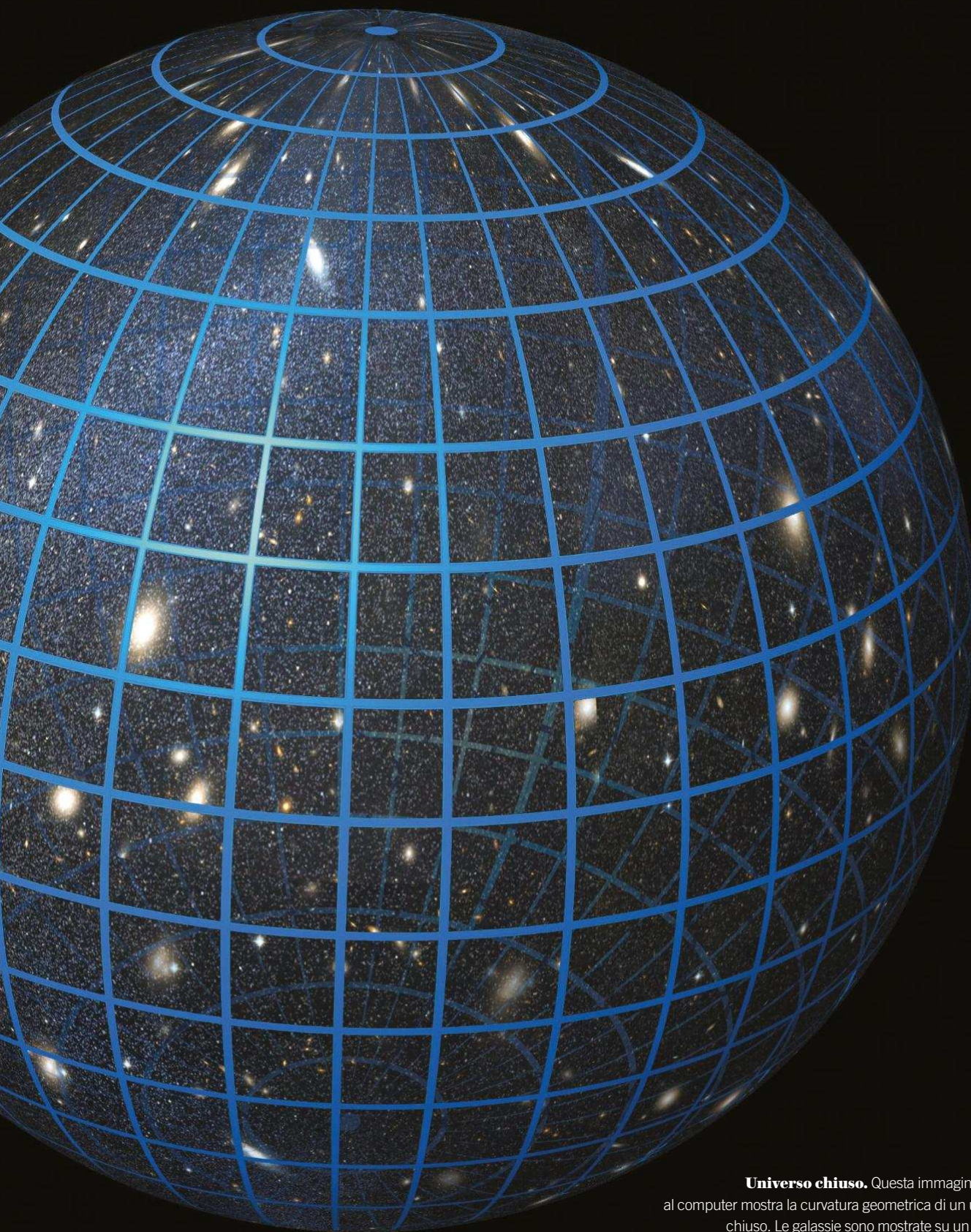
di Andrea Capocci

IN BREVE

Il modello standard della cosmologia descrive un universo piatto, che rispetta la geometria euclidea, ovvero un cosmo in cui due rette parallele non si incontrano e la somma degli angoli interni di un qualsiasi tipo di triangolo fa sempre 180 gradi.

Questo modello dipende da parametri come la densità di materia ed energia oscure o la velocità di espansione del cosmo, il cui valore è stato misurato con osservazioni astronomiche.

Ma un'analisi recente della radiazione cosmica di fondo, cioè le onde elettromagnetiche che riempiono il cosmo dall'epoca immediatamente successiva al big bang, indicherebbe che viviamo in un universo curvo.

Nei prossimi anni, diversi progetti di ricerca verificheranno la solidità del modello cosmologico standard.

Henning Dalhoff/SPL/AGF

Andrea Capocci è fisico teorico. Dopo aver svolto attività di ricerca in Svizzera e in Italia, oggi lavora come giornalista scientifico per il quotidiano «il Manifesto» e per diverse testate *on line*.

Quando nel 1919 l'astronomo britannico Arthur Eddington dimostrò che la luce proveniente dall'ammasso stellare delle Iadi deviava passando vicino al Sole, fu confermata una delle previsioni più importanti della relatività generale di Albert Einstein, formulata quattro anni prima: la massa può modificare la geometria dello spazio in cui viaggia la luce, allontanandola dal percorso rettilineo che seguirebbe se viaggiasse nel vuoto.

Fino ad allora si riteneva che la luce viaggiasse sempre lungo linee rette che rispettano le regole della geometria euclidea: due rette parallele non si incontrano mai e la somma degli angoli di un triangolo è sempre 180 gradi, come nelle figure disegnate su un foglio di carta. La teoria generale della relatività sfidava queste ipotesi apparentemente ragionevoli dando vita a una controversia sulla geometria dell'universo non ancora conclusa. Nemmeno le osservazioni sempre più precise fornite dalle missioni spaziali riescono a chiudere il dibattito: mentre una parte della comunità scientifica parla abitualmente di «cosmologia di precisione» e di «modello standard» dell'universo, altri sostengono che ci troviamo nel bel mezzo di una «crisi della cosmologia», la scienza che studia la struttura e l'evoluzione dell'universo.

Un universo non euclideo?

Immaginare che due rette parallele possano incontrarsi non è difficile per chi vive su un pianeta sferico come il nostro. Due meridiani attraversano l'equatore come rette parallele ma si congiungono ai poli. E la somma degli angoli interni del triangolo formato dai meridiani e dal tratto di equatore che li unisce è maggiore di 180 gradi. Non c'è contraddizione con la geometria che si studia a scuola, perfettamente valida. Su distanze piccole come un foglio di carta, la Terra appare piatta e la sua geometria euclidea. Solo su distanze maggiori possiamo renderci conto che la Terra è una sfera e che rette e triangoli rispettano regole diverse.

Allo stesso modo, nella vita quotidiana la luce sembra seguire le regole della geometria euclidea. Ma su scale più grandi, come la distanza tra le Iadi e la Terra, pari a 151 anni luce, è possibile osservare piccole distorsioni. Su distanze ancora maggiori la luce potrebbe rispettare la geometria euclidea, salvo deviazioni locali provocate dalla massa di stelle e galassie, oppure la distribuzione complessiva della materia potrebbe conferire all'intero universo una geometria diversa da quella a cui siamo abituati.

Come già accennato, la questione si aprì subito dopo la conferma della teoria generale della relatività, secondo cui la massa e quindi anche l'energia, che è legata alla massa da un'altra equazione di Einstein ($E = mc^2$), curvano lo spazio. Per determinare la geometria dello spazio su larga scala bisogna sapere come è distribuita la materia nell'universo. La porzione osservabile dalla Terra però è limitata, perché la luce proveniente dalle regioni più lontane non avrebbe ancora avuto il tempo di giungere a noi. Motivo per cui mappare tutto l'universo per scoprire questa distribuzione è fisicamente impossibile.

Per ovviare a questa difficoltà, gli scienziati si affidano al «principio cosmologico», introdotto per la prima volta da Isaac Newton nel 1687. Secondo questo principio la materia nell'universo è distribuita in modo uniforme e, se consideriamo regioni di spazio abbastanza grandi, la quantità di stelle e galassie contenuta in un certo volume è la stessa ovunque. Di conseguenza, le proprietà dell'universo appaiono identiche da qualunque punto lo si osservi. Alla luce delle equazioni di Einstein, il principio cosmologico implica che un'eventuale curvatura dell'universo debba essere uguale in ogni punto. Le configurazioni compatibili con il principio cosmologico sono poche. Immaginarle in uno spazio tridimensionale è difficile, ma limitandosi a due dimensioni è possibile visualizzarle.

In due dimensioni, l'universo euclideo corrisponde a un foglio perfettamente piatto di estensione infinita. Le geometrie non euclidee a curvatura costante possono avere solo due forme. Una è la superficie di una sfera, ed è detta «chiusa» perché muovendo-

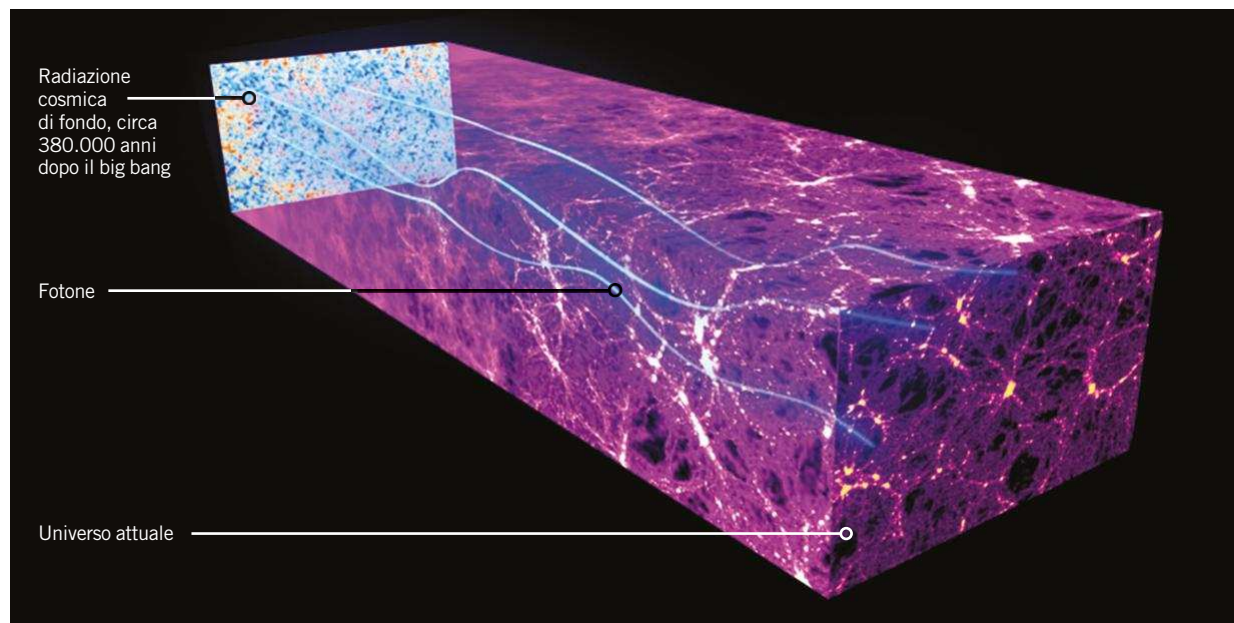
Effetto lente sui fotoni dei primordi

La radiazione cosmica di fondo è la radiazione elettromagnetica diffusa in tutto l'universo. Risale alla cosiddetta «fase della ricombinazione» (circa 380.000 anni dopo il big bang) quando protoni ed elettroni si legarono e formarono i primi atomi. Con ottima approssimazione, la radiazione cosmica di fondo è uguale a quella emessa da un corpo con una temperatura di circa 2,7 kelvin (circa –270 gradi Celsius).

Tuttavia, la radiazione proveniente da punti diversi del cielo mostra piccole variazioni di temperatura che dipendono dalle disomogeneità dell'universo al momento della ricombinazione. Da osservazioni effettuate dai cosmologi è possibile stimare l'entità di queste disomogeneità e le corrispondenti irregolarità della temperatura. Per verificare la correttezza del modello cosmologico usato è possibile confrontare le previsioni teoriche con le osservazioni.

Il satellite Planck dell'Agenzia spaziale europea ha misurato queste irregolarità con una risoluzione angolare molto elevata, rilevando differenze di temperatura tra punti del cielo le cui linee di vista rispetto all'osservatore divergono di circa un decimo di grado. Secondo Alessandro Melchiorri della «Sapienza» Università di Roma e i suoi collaboratori, tra i dati e la teoria c'è una lacuna. Le irregolarità nella temperatura su piccola scala sono meno pronunciate rispetto alle previsioni teoriche. Questo risultato potrebbe essere spiegato dal fenomeno del «lensing», cioè dalla deviazione della luce causata dalla materia nell'universo (*illustrazione*), la cui gravità provoca a sua volta la curvatura dell'universo.

A causa della curvatura, i fotoni che formano la radiazione di fondo si mescolerebbero, nello stesso modo in cui un'immagine osservata dietro una lente opaca appare sfocata. Di conseguenza, le irregolarità della temperatura previste dalla teoria risulterebbero appiattite dal lensing. Secondo questa ipotesi, per Melchiorri e collaboratori l'intensità dell'appiattimento sarebbe più compatibile con un universo chiuso che con un universo piatto.

Cortesia ESA e Collaborazione Planck

si lungo una direzione dopo un po' si torna al punto di partenza. L'altra è simile a una sella: in questo caso si parla di una superficie curva ma «aperta» perché, come nel caso del piano, seguendo una direzione ci si allontana indefinitamente dalla posizione iniziale (*si veda l'illustrazione a p. 66*).

Come capì per primo il fisico sovietico Aleksandr Alexandrovich Friedmann, è la densità di massa ed energia a determinare se l'universo sia chiuso oppure aperto. Nel 1922 Friedmann elaborò un modello dinamico ipotizzando che l'universo possa espandersi oppure contrarsi e lo riassunse in due celebri equazioni che prendono il suo nome. Secondo queste equazioni, la materia con la sua attrazione gravitazionale rallenta l'espansione dell'universo e, al di sopra di una certa densità critica pari a circa sei atomi di idrogeno per metro cubo, conferisce all'universo una geometria chiusa. Pochi anni dopo l'astronomo statunitense Edwin Hubble scoprì che l'universo si espande davvero, e l'interesse per il modello di Friedmann crebbe enormemente. Sulla base delle equazioni del fisico sovietico nacque la teoria del big bang. Per capire la geometria e l'evoluzione dell'universo, non rimaneva che stimare i parametri delle equazioni di Friedmann, prime fra tutti la densità di massa e di energia.

Due questioni oscure

A quasi un secolo di distanza, natura e densità della materia e dell'energia contenute nell'universo sono ancora tra gli interrogativi principali per la fisica teorica. La quantità della materia ordinaria, cioè quella che forma gli atomi, può essere stimata direttamente. Dalle osservazioni emerge che la densità media della materia ordinaria nell'universo è molto bassa, circa la massa di un protone quando non è in movimento, $1{,}67 \times 10^{-27}$ chilogrammi ogni 4 metri cubi.

Tuttavia, la materia ordinaria non è in grado di spiegare le caratteristiche su larga scala dell'universo. Stelle, galassie e ammassi di galassie si aggregano in formazioni ancora più grandi, fino a

formare «super-ammassi», «filamenti», «muri» che possono estendersi per centinaia di milioni di anni luce, cioè migliaia di volte più grandi della nostra galassia. Solo al di là di questa scala l'universo può essere considerato davvero omogeneo come prevede il principio cosmologico.

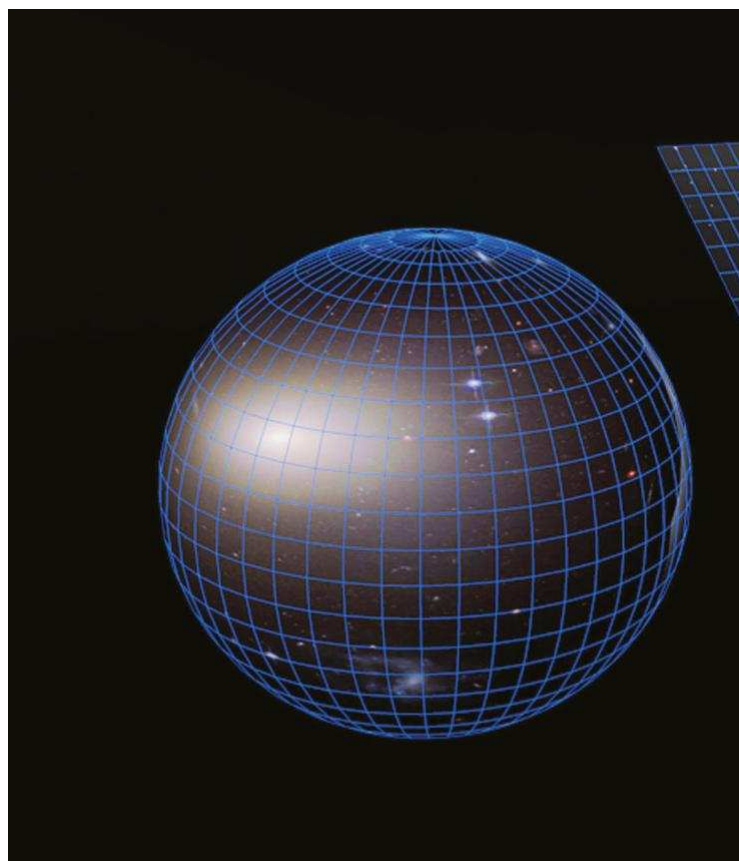
Tuttavia, la materia è troppo rarefatta per creare le grandi strutture cosmiche che osserviamo. Secondo i cosmologi la loro formazione si spiega con l'esistenza di un'altra forma di materia, detta «oscura» perché non è visibile ai nostri telescopi, che eserciterebbe la forza di gravità necessaria per tenere insieme aggregazioni così grandi. Secondo la teoria, la materia oscura si muove a velocità molto inferiori a quelle della luce. Dato che nella materia ordinaria la temperatura di una sostanza è legata alla velocità delle sue particelle, la materia oscura è detta «fredda».

L'ipotesi della materia oscura spiegherebbe anche la rotazione anomala delle galassie a spirale scoperta dall'astronoma Vera Rubin tra gli anni settanta e ottanta. Le stelle più esterne di queste galassie si muovono con la stessa velocità di quelle vicine al bulbo centrale. In assenza di materia oscura, in un sistema rotante in cui è presente solo la forza di gravità i corpi più esterni dovrebbero ruotare più lentamente, come suggerì per primo Keplero nel Seicento osservando il sistema solare. La presenza della materia oscura intorno alle galassie risolverebbe questo enigma.

E non è finita qui. Alla fine degli anni novanta, osservando supernove distanti, ovvero esplosioni immani di stelle, due gruppi indipendenti guidati dagli statunitensi Saul Perlmutter, Adam Riess e Brian Schmidt hanno scoperto un fenomeno sorprendente. Malgrado la materia tenda ad aggregarsi sotto l'azione della forza di gravità, l'universo non sta collassando su se stesso, anzi: l'espansione dell'universo sta accelerando. Secondo i cosmologi, questa accelerazione è causata da un'ulteriore forma di energia, chiamata «energia oscura» perché la sua natura è ancora misteriosa, che contrasta la gravità e alimenta l'espansione. L'attuale modello dell'universo prevede approssimativamente che la materia ordinaria costituisca solo il 5 per cento dell'universo, la materia oscura il 26 per cento e l'energia oscura il 69 per cento. Con il risultato che il 95 per cento del contenuto dell'universo ci è del tutto ignoto e finora non è mai stato osservato direttamente.

Il modello standard della cosmologia

Le equazioni di Friedman insieme alle ipotesi della materia e dell'energia oscure costituiscono una sorta di «modello standard» per la cosmologia. Il modello è indicato con la sigla ΛCDM, dove la lettera greca «lambda» (Λ) si riferisce all'energia oscura: Λ era il simbolo di una costante cosmologica già introdotta da Einstein nella sua teoria dell'universo per contrastare il collasso gravitazionale. «CDM» sta per *cold dark matter*, la «materia oscura fredda». Il modello dipende da parametri come densità di materia ed energia oscure o la velocità di espansione dell'universo, il cui valore esatto è stato misurato sempre più precisamente, interpretando i dati ottenuti in osservazioni astronomiche indipendenti tra loro.

Questa procedura di approssimazione successiva ha fatto nascere l'espressione «cosmologia di precisione» o «modello di concordanza». «Di precisione, perché i parametri del modello sono misurati con precisione dell'1 per cento, e in alcuni casi dell'1 per mille e oltre», spiega Silvia Galli dell'Institut d'Astrophysique di Parigi. «Di concordanza – aggiunge Galli – perché questo modello descrive con pochi parametri liberi una gamma di osservazioni impressionante, come l'abbondanza di elio e deuterio, la radiazione cosmica di fondo, la distribuzione statistica delle grandi strutture in varie epoche dell'universo. Il modello non è perfetto, ci sono incongruenze. Per esempio riguardo all'abbondanza di litio primordiale, che secondo il modello dovrebbe essere tre volte maggiore rispetto a quello osserviamo, o al valore della costante di Hubble, che determina la velocità con cui le galassie si allontanano tra loro al variare della loro distanza. Servirà un lavoro notevole per capire se queste incongruenze siano dovute a errori osservativi o a lacune del modello».

Oltre all'esistenza di materia ed energia oscure, il modello ΛCDM ipotizza che l'universo sia «piatto», cioè che la sua geometria su larga scala rispetti le regole della geometria euclidea. La densità totale dell'energia nell'universo sia sotto forma di radiazione che di materia ordinaria e oscura deve essere proprio quella critica calcolata da Friedmann. Dunque, se nelle osservazioni emergesse una stima della densità radicalmente diversa, una delle ipotesi fondamentali del modello ΛCDM e della cosmologia di precisione verrebbe a cadere.

La radiazione cosmica di fondo

La principale fonte di informazioni sulla struttura su larga scala del cosmo è la cosiddetta «radiazione cosmica di fondo». Si tratta delle onde elettromagnetiche che riempiono l'universo dall'epoca immediatamente successiva al big bang, un'espressione impropria perché suggerisce che l'universo sia iniziato con un'esplosione. L'idea che si sono fatti gli scienziati non prevede nessuno scoppio: riavvolgendo all'indietro il nastro dell'espansione osservata da Hubble, i cosmologi ritengono che circa 14 miliardi di anni fa l'universo occupasse un volume piccolo, denso e caldissimo in cui particelle elementari e onde elettromagnetiche, o «fotoni», formavano un gas estremamente turbolento. L'espansione causò

Tre geometrie per l'universo. Questa illustrazione mostra le configurazioni del cosmo compatibili con il principio cosmologico, cioè con una distribuzione uniforme di materia, e con una curvatura costante, come previsto dalla relatività generale. La prima e l'ultima da sinistra sono non euclidee; la sfera in particolare è una geometria chiusa: muovendosi lungo una direzione si torna al punto di partenza; questo non vale per la sella. Il piano al centro è un universo euclideo. Gli scienziati dibattono sulla forma del nostro cosmo:per alcuni è piatto, per altri invece è curvo.

il raffreddamento dell'universo e, quando la temperatura arrivò tra 3000 e 4000 kelvin, protoni con carica elettrica positiva ed elettroni carichi negativamente iniziarono a formare i primi atomi neutri. Si tratta della fase della «ricombinazione», avvenuta circa 380.000 anni dopo il big bang. A quel punto i fotoni smisero di interagire con le particelle cariche elettricamente e poterono diffondersi liberamente in ogni direzione.

La dilatazione dello spazio è poi proseguita mentre nell'universo si formavano strutture più complesse e ha avuto l'effetto di «stirare» le onde elettromagnetiche aumentandone la lunghezza d'onda. Qualcosa di simile a quello che avviene se disegniamo piccole macchie su un palloncino sgonfio: quando il palloncino si gonfia, anche le macchie si dilatano.

La radiazione di fondo che osserviamo oggi è composta proprio da quei fotoni che si diffusero nell'universo dopo la ricombinazione e il successivo «stiramento». È stata rilevata per la prima volta nel 1964 dai fisici statunitensi Arno Penzias e Robert W. Wilson, che per la scoperta hanno ricevuto il premio Nobel nel 1978. Dalla sua scoperta, la radiazione cosmica di fondo è stata studiata sempre più in dettaglio perché trasporta preziose informazioni sull'universo primordiale.

Questa radiazione contiene fotoni di ogni lunghezza d'onda, proprio come quella proveniente dal Sole. Tra i fotoni solari, quelli con una lunghezza d'onda di circa mezzo milionesimo di metro sono più abbondanti degli altri e possono essere rilevati dalle cellule visive umane. I fotoni dominanti nella radiazione di fondo, invece, hanno una lunghezza d'onda 2000 volte più grande, pari a circa un millimetro a causa dello «stiramento» subito durante l'espansione dell'universo. Si tratta dunque di «microonde», non troppo diverse da quelle con cui scaldiamo il caffè. Secondo una legge stabilita sperimentalmente dal fisico tedesco Wilhelm Wien nel 1893, la lunghezza d'onda dominante nella radiazione emessa da un corpo è inversamente proporzionale alla temperatura del corpo stesso. La lunghezza d'onda dominante nella radiazione solare indica che la superficie della nostra stella ha una temperatura di circa 6000 kelvin (cioè 5700 gradi Celsius). La temperatura della radiazione cosmica di fondo è invece 2000 volte inferiore: circa 3 kelvin. Come è stato stabilito nel 1993 dalla missione Cosmic Background Explorer della NASA, il suo valore esatto è 2,7 kelvin.

Le osservazioni successive hanno dimostrato che la temperatura della radiazione di fondo non è esattamente la stessa in ogni direzione di osservazione, ma ha piccolissime irregolarità, dette «anisotropie», dell'ordine di una parte su 100.000. Se si colorasse ogni punto della volta celeste in base alla temperatura della radiazione di fondo, nella mappa del cielo osserveremmo «macchie» corrispondenti a regioni più calde separate da altre macchie che corrispondono a regioni più fredde, al cui interno sono visibili altre macchie ancora più piccole.

Queste irregolarità sono una miniera d'oro per i cosmologi. Secondo la teoria del big bang dipendono dallo stato dell'universo immediatamente successivo alla fase della ricombinazione e dalla geometria dello spazio attraversato dai fotoni giunti fino a noi. Le macchie principali dipendono dalle fluttuazioni di densità della materia nell'universo primordiale e possono essere ingrandite o rimpicciolite dalla curvatura dell'universo dovuta alla densità di materia ed energia.

Poiché disponiamo di metodi affidabili per stimare la densità di particelle al momento della ricombinazione, l'ampiezza delle macchie principali fornisce informazioni dirette sulla geometria dell'universo. L'ampiezza si misura con l'angolo formato dalle linee

che, dall'osservatore, puntano a due macchie adiacenti sulla volta celeste. Se l'universo fosse piatto e la densità di materia e energia fosse quella critica, le macchie più grandi nella mappa delle temperature dovrebbero avere un'ampiezza di circa un grado.

Da BOOMERanG a Planck

La prima missione che ha registrato dati dettagliati su queste fluttuazioni si chiamava BOOMERanG (da Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics). Nel 1998 il gruppo di ricerca guidato dall'astronomo Paolo De Bernardis, della «Sapienza» Università di Roma, e da Andrew Lange, del California Institute of Technology di Pasadena, avevano installato un telescopio su un pallone aerostatico che aveva fluttuato nella stratosfera al di sopra dell'Antartide per circa 11 giorni. L'analisi dei dati pubblicata due anni dopo su «Nature» aveva confermato che le macchie di temperatura hanno un'ampiezza media proprio di un grado. La densità di materia ed energia nell'universo era proprio quella critica prevista da Friedmann. L'ipotesi della teoria ΛCDM, che presupponeva un universo piatto, era sembrata verificata dai dati.

I risultati di BOOMERanG sono stati confermati anche da altri osservatori terrestri come MAXIMA (Millimeter-wave Anisotropy Experiment Imaging Array), DASI (Degree Angular Scale Interferometer), CBI (Cosmic Background Imager), VSA (Very Small Array), Archeops e ACBAR (Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver). Negli anni successivi sono state avviate due missioni più ambiziose, perché prevedevano di mettere in orbita telescopi per osservare il cielo senza il disturbo dell'atmosfera. La prima è stata organizzata dalla NASA e chiamata WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Il satellite WMAP è stato lanciato nel 2001 e ha registrato dati con sempre maggior dettaglio fino al 2008, confermando l'ipotesi dell'universo piatto. L'anno dopo è stato messo in orbita dall'Agenzia spaziale europea (ESA) il satellite Planck, che ha scrutato il cosmo fino al 2013.

La missione Planck ha messo a disposizione della comunità scientifica la più ricca mole di dati sulla radiazione di fondo. Dalla loro prima pubblicazione, i dati sono stati oggetto di analisi sempre più raffinate sia da parte degli scienziati della collaborazione sia da ricercatori esterni. L'ultima versione del catalogo di dati è stata pubblicata su Internet nel 2018 e i relativi articoli sono in corso di pubblicazione sulla rivista «Astrophysics & Astronomy».

Per la maggior parte dei cosmologi, anche i dati della missione Planck rappresentano una sostanziale conferma del modello ΛCDM e permettono di determinare i parametri cosmologici con più precisione rispetto alle missioni precedenti. L'età dell'universo viene stimata in 13,8 miliardi di anni. La costante di Hubble in circa 68 chilometri per secondo per megaparsec.

Nella collaborazione Planck, però, non tutti sostengono che le osservazioni del satellite confermino il modello ΛCDM. Il gruppo di ricerca guidato da Alessandro Melchiorri, della «Sapienza» Università di Roma, in un articolo pubblicato a novembre 2019 su «Nature Astronomy» insieme a Eleonora Di Valentino, dell'Università di Manchester, e al britannico Joseph Silk, dell'Institut d'Astrophysique di Parigi, ha concluso che i dati della missione Planck sono in maggiore accordo con un universo curvo, non piatto. La tesi deriva dall'analisi della deformazione delle «macchie» della radiazione cosmica di fondo determinata dalla materia.

I fotoni liberati all'epoca della ricombinazione e rilevati da Planck hanno attraversato una porzione di universo in cui ci sono materia ed energia che ne deviano la traiettoria e tendono a rimescolarli. Il fenomeno è detto «lensing», perché ricorda quello che avviene alla luce quando attraversa una comune lente ottica, e rende più uniforme la distribuzione delle anisotropie della radiazione sulle scale angolari più piccole (*si veda il box a p. 65*). «In passato questo tipo di analisi non era fattibile perché le missioni precedenti, come WMAP o BOOMERanG, non disponevano di una sufficiente risoluzione angolare», spiega Melchiorri.

L'intensità del *lensing* permette di stimare la quantità di materia diffusa nello spazio. Per spiegare il lensing rilevato nei dati di Planck, la densità di materia dovrebbe essere superiore del 4 per cento rispetto alla densità critica. Questo implica che la geometria dell'universo non sia piatta e aperta, ma sferica e chiusa, facendo saltare una delle ipotesi del modello ΛCDM. «Il dato sul lensing era noto a tutti fin dai primi dati della missione Planck pubblicati nel 2013 – dice Melchiorri – ma dopo il successo di BOOMERanG l'ipotesi dell'universo piatto era data per scontata un po' da tutti gli scienziati, per cui quella distorsione del quattro per cento non aveva ottenuto molto risalto».

Secondo Di Valentino, Melchiorri e Silk, una maggiore densità di energia e un universo chiuso permetterebbero di risolvere altre anomalie nei dati di Planck. «In questo modo si spiegherebbe anche perché la correlazione statistica tra le anisotropie a distanze angolari maggiori di 60 gradi sono più basse del previsto». Di Valentino e colleghi parlano di una «possibile crisi» nella cosmologia, riferendosi alla necessità di superare il modello ΛCDM. Melchiorri ci tiene a precisare: «Non si tratta di una diatriba tra i sostenitori di un universo piatto e quelli di un universo curvo. Il nostro risultato, piuttosto, vuole evidenziare una crisi della cosmologia di concordanza basata sul modello ΛCDM, che dovrebbe fondarsi su osservazioni in accordo fra loro. E questo accordo non c'è».

Il 95 per cento del contenuto dell'universo ci è del tutto ignoto, fino a oggi non è mai stato osservato in modo diretto

È una vera crisi?

Altri scienziati mantengono invece un atteggiamento più cauto. Secondo Antony Lewis, ricercatore all'Università del Sussex e tra i coordinatori dell'analisi dei dati ottenuti con Planck insieme a Galli e al britannico George Efstathiou, dell'Università di Cambridge, «l'effetto del lensing sulle anisotropie della radiazione di fondo è analogo a quello di un'immagine vista attraverso un vetro non levigato, che ne sfuma i contorni. Nel caso dei dati della missione Planck, il lensing imprevisto potrebbe dipendere da una fluttuazione statistica, da una maggiore curvatura spaziale o da qualunque altro effetto fisico che aumenta il lensing. Il problema è che disponiamo di molte altre misurazioni dirette della curvatura spaziale, come quella basata sulle oscillazioni acustiche barioniche [le onde che si formarono nel gas di particelle dell'universo primordiale e oggi sono responsabili di variazioni di densità della materia su larga scala, N.d.A.]. Ma queste osservazioni, se confrontate con i dati della missione Planck, contraddicono l'ipotesi di un universo chiuso».

Melchiorri non è d'accordo con questa interpretazione dei da-

ti: «I dati sulle oscillazioni acustiche barioniche o le misurazioni della velocità di espansione dell'universo presi singolarmente suggeriscono che l'universo sia chiuso. Solo se si ipotizza a priori che le varie osservazioni siano in accordo tra loro l'universo piatto diventa lo scenario più probabile».

In febbraio Efstathiou ha pubblicato una nuova analisi dei dati di Planck sull'archivio on line www.arxiv.org insieme a Steven Gratton, anche lui dell'Università di Cambridge. Secondo il nuovo studio, basato però su una nuova metodologia di analisi dei dati, la differenza sulla curvatura è essenzialmente un accidente statistico compatibile con l'ipotesi dell'universo piatto.

Infatti, anche se il valore della densità stimato a partire dal lensing non fosse esattamente quello critico, lo spostamento potrebbe dipendere da una semplice fluttuazione statistica. La misurazione di un parametro cosmologico ha un significato statistico, perché descrive la probabilità che il valore esatto cada in un certo intervallo. Quindi due misure sono ritenute compatibili se la probabilità che il valore esatto dell'una coincida con quello dell'altra supera una certa soglia. Nel caso della densità di materia, la probabilità che quel 4 per cento in più rispetto alla densità critica sia dovuta una fluttuazione statistica è solo dell'1 per cento. Bassa, ma non trascurabile. In fisica delle particelle, dove si osservano standard sperimentali molto rigidi, due valori sono ritenuti incompatibili se la probabilità di una fluttuazione statistica che spieghi la loro differenza scende sotto lo 0,00003 per cento.

La storia della fisica è costellata di casi analoghi, in cui un esperimento dà un valore diverso rispetto a quello previsto dalla teoria

I sostenitori del modello ΛCDM, dal canto loro, sottolineano che se si ammette l'ipotesi di un universo curvo gli altri parametri cosmologici assumono valori lontanissimi da quelli ottenuti in altre osservazioni. La costante di Hubble, per esempio, sarebbe circa 54 chilometri per secondo per megaparsec, assai lontana dai valori compresi tra 67 e 71 suggeriti da altri osservazioni e accettati dalla comunità dei cosmologi. «Se l'ipotesi di un universo curvo provoca un conflitto tra le stime degli altri parametri e quelle ottenute da altre osservazioni, significa che probabilmente la curvatura non è la soluzione», conclude Lewis. «La spiegazione più semplice è una fluttuazione statistica, magari insieme a un piccolo errore sistematico. Le prossime osservazioni della radiazione di fondo potrebbero rilevare anche altri effetti fisici che spiegherebbero l'eccesso di lensing, come una diversa composizione della materia che potrebbe aver influito sull'espansione prima della ricombinazione». Per Melchiorri, invece, se ammettere una piccola variazione nella curvatura del cosmo fa variare tanto gli altri parametri significa che il modello sottostante non è quello giusto.

Critiche al modello ΛCDM non vengono solo dalla curvatura dell'universo. A fine 2019 uno studio di ricercatori della Yonsei University di Seul, in Corea del Sud, del Korea Astronomy and Space Science Institute e dell'Università di Lione ha analizzato un insieme di supernove del cosiddetto tipo Ia, e ha concluso che la loro luminosità non ha un valore standard come si riteneva, ma dipende dall'età delle stelle. Le supernove di tipo Ia sono le stesse che hanno permesso di scoprire, grazie alla loro «luminosità standard», l'espansione accelerata dell'universo, spingendo i cosmologi a postulare l'esistenza dell'energia oscura. Se la luminosità delle supernove Ia non valesse come riferimento, l'espansione dell'universo e l'esistenza stessa dell'energia oscura perderebbero una delle evidenze empiriche. Diversi cosmologi, tuttavia, hanno espresso riserve sullo studio coreano, che presenta diverse incongruenze: nello studio, per esempio, alcune galassie finirebbero per avere un'età più vecchia dell'universo stesso.

La storia della fisica è costellata di casi analoghi, in cui un esperimento dà un valore diverso rispetto a quanto previsto dalla teoria. A volte l'anomalia scompare da sé, perché la comunità è in grado di mettere d'accordo la teoria con il dato. Ma se teoria e osservazione risultano inconciliabili gli scienziati devono escogitare una nuova teoria, con un'inerzia che dipende dal grado di solidità della teoria in crisi e di quella emergente.

Le prossime ricerche

Nei prossimi anni diversi progetti di ricerca ora in corso di progettazione forniranno nuovi elementi per stabilire se le anomalie individuate nello spettro della radiazione cosmica di fondo debbano mettere in discussione il modello ΛCDM oggi accettato.

Un consorzio di università statunitensi con la Simons Foundation ha in progetto la costruzione di un nuovo osservatorio nel deserto di Atacama, sulle Ande cilene, dedicato all'osservazione e allo studio della radiazione cosmica di fondo minimizzando il disturbo causato dall'atmosfera. La realizzazione del telescopio, che avrà un'apertura massima di 6 metri, coinvolge università e centri di ricerca di 12 paesi, tra cui l'Università degli Studi di Milano e la Scuola internazionale superiore di studi avanzati di Trieste. I primi dati dovrebbero essere registrati nel 2022. L'obiettivo sarà rilevare le onde gravitazionali presenti nell'universo primordiale, un'altra previsione del modello ΛCDM.

Nuove informazioni sulla geometria a larga scala dell'universo giungeranno anche da una sonda satellitare dell'ESA denominata EUCLID, che dovrebbe essere lanciata nel 2022. EUCLID coinvolgerà quasi 1000 scienziati di 13 paesi europei, con un forte contributo di enti di ricerca e università italiane e anche della NASA. La missione punta a realizzare la mappa più precisa delle galassie lontane, fino a 10 miliardi di anni luce da noi, pari al tempo impiegato dalla loro radiazione per raggiungere la Terra. In questo arco temporale, secondo il «modello standard» l'espansione dell'universo è stata prima frenata dalla materia oscura e poi accelerata dall'energia oscura, e la distribuzione delle galassie dovrebbe rispecchiare questa evoluzione, o escluderla. Le osservazioni di EUCLID saranno un nuovo banco di prova per la solidità della teoria ΛCDM e per l'ipotesi dell'universo piatto. ■

PER APPROFONDIRE

Planck Evidence for a Closed Universe and a Possible Crisis for Cosmology. Di Valentino E., Melchiorri A. e Silk J., in «Nature Astronomy», Vol. 4, pp. 196-203, n. 2, 1 febbraio 2020.

The Evidence for a Spatially Flat Universe. Efstathiou G. e Gratton S., su arXiv.org, 17 febbraio 2020. **https://arxiv.org/abs/2002.06892.**

La lista delle pubblicazioni della collaborazione Planck: **https://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications.**

L'impronta del big bang. Matarrese S., Melchiorri A. e Riotto A., in «Le Scienze» n. 461, gennaio 2007.

EVOLUZIONE

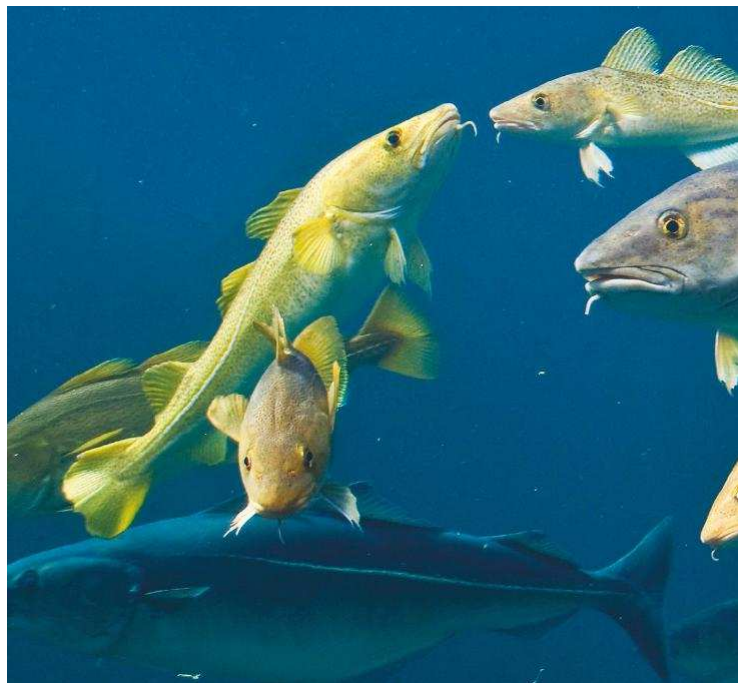
Nuovi geni da zero

di *Adam Levy*

Nel cuore dell'inverno, la temperatura delle acque coperte dai ghiacci dell'Oceano Artico può scendere sotto zero. Fa abbastanza freddo da congelare molti pesci, ma il merluzzo non ha problemi: nel sangue e nei tessuti ha una proteina che si lega ai minuscoli cristalli di ghiaccio, fermandone la crescita. Helle Tessand Baalsrud, biologa evoluzionistica, voleva capire da dove proveniva questo talento del merluzzo.

Insieme al suo gruppo all'Università di Oslo, la scienziata norvegese ha analizzato i genomi del merluzzo nordico (*Gadus morhua*) e di alcuni suoi parenti stretti, con l'idea di rintracciare i cugini del gene antigelo. Non ne hanno trovato neanche uno. Baalsrud, che allora era diventata madre da poco, è arrivata addirittura a temere che la mancanza di sonno le stesse facendo sfuggire qualcosa di ovvio.

Poi però si è imbattuta in diversi studi che suggerivano che non sempre i geni si evolvono da geni esistenti, come supposto da tempo dai biologi. Alcuni geni, invece, sono ricavati da desolati tratti del genoma che non codificano per nessuna molecola funzionale. Quando è tornata di nuovo ai genomi dei pesci, la scienziata ha trovato indizi che fosse proprio così: la proteina antigelo – essenziale per la sopravvivenza del merluzzo – sembrava essere stata costruita partendo da zero. Nel frattempo anche un altro ricercatore era giunto a conclusioni simili.

Il merluzzo è in buona compagnia. Negli ultimi cinque anni alcuni ricercatori hanno trovato numerosi indizi di geni nuovi di zecca, detti geni *de novo*, in tutte le linee di discendenza che hanno esaminato. Fra queste ci sono organismi modello come il moscerino della frutta e il topo, importanti piante coltivate e l'essere umano; alcuni di questi geni sono espressi nel cervello e nei tessuti testicolari, altri in varie forme di cancro.

I geni de novo stanno addirittura sollecitando un ripensamento di alcune parti della teoria evolutiva. L'idea condivisa era che i nuovi geni tendono a emergere quando quelli già esistenti vengono accidentalmente duplicati, mescolati con altri o fatti a pezzi, ma adesso alcuni ricercatori pensano che i geni de novo possano essere decisamente comuni: certi studi suggeriscono che almeno un decimo dei geni possa avere origine in questo modo; altri stimano che i geni de novo potrebbero essere più numerosi rispetto a quelli che emergono da duplicazioni geniche. La loro esistenza confonde il confine di che cosa sia un gene, rivelando che il materiale di partenza per alcuni nuovi geni è il DNA non codificante (*si veda il box a p. 73*).

La capacità degli organismi di acquisire nuovi geni in questo modo testimonia la «plasticità» dell'evoluzione «nel rendere possibili cose apparentemente impossibili», dice Yong Zhang, genetista dell'Istituto di zoologia dell'Accademia cinese delle scienze di Pechino, che ha studiato il ruolo dei geni de novo nel cervello umano.

Tuttavia i ricercatori devono ancora capire come identificare in modo definitivo i geni de novo, e restano aperte diverse domande su come esattamente – e quanto spesso – nascano questi geni. Gli scienziati si chiedono inoltre perché l'evoluzione debba prendersi la briga di fare geni da zero quando c'è già tanto materiale pronto

blickwinkel/McPHOTO/BIO/Alamy

Da tempo gli scienziati sono convinti che nuovi geni emergono solo quando l'evoluzione lavora su quelli vecchi. Ora però si scopre che la selezione naturale è molto più creativa

Adam Levy è un giornalista scientifico. La versione originale dell'articolo è stata pubblicata su «Nature», Vol. 574, 17 ottobre 2019.

Con l'antigelo naturale. In alcune specie di merluzzo c'è un gene nuovo di zecca che è coinvolto nella prevenzione del congelamento dei pesci e che dunque aiuta a sopravvivere nelle fredde acque coperte dai ghiacci all'estremo nord della Terra, nell'Oceano Artico.

da cui partire. Sono domande di fondo, che danno il senso di quanto il campo sia ancora giovane. «Non c'è bisogno di tornare indietro di molti anni per trovare il momento in cui l'evoluzione de novo dei geni è stata scartata», dice Baalsrud.

Nuovi arrivati

Negli anni settanta i genetisti vedevano l'evoluzione come un processo piuttosto conservatore. Quando Susumu Ohno aveva ipotizzato che la maggior parte dei geni si evolve per duplicazione, aveva scritto: «Strettamente parlando, nulla nell'evoluzione è creato ex novo. Ogni nuovo gene deve emergere da uno esistente».

La duplicazione dei geni avviene quando qualche errore nella replicazione del DNA produce più copie di un gene. Nel corso delle generazioni, le copie accumulano mutazioni e divergono, e alla fine codificano per molecole diverse, ognuna con una sua funzione. Dai tempi di Ohno, i ricercatori hanno trovato un gran numero di altri esempi di come l'evoluzione traffica con i geni: i quali, per esempio, possono essere fatti a pezzi o trasferiti, «lateralmente», da una specie all'altra. Tutti questi processi hanno qualcosa in comune: il loro ingrediente principale è un tratto codificante già esistente e ben inserito in un oliato meccanismo molecolare.

Ma nei genomi c'è molto di più dei soli geni: di fatto, solo una piccola percentuale del genoma umano, per esempio, codifica geni. Ci sono anche ampi tratti di DNA – spesso ancora detto «DNA spazzatura» – che sembrano privi di funzione. Alcuni di questi tratti condividono certe caratteristiche con i geni che codificano per le proteine pur senza essere essi stessi geni: per esempio sono pieni di codoni di tre lettere che, in teoria, potrebbero dire alla cellula di tradurre il codice in una proteina.

Solo nel XXI secolo gli scienziati hanno cominciato a osservare indizi per cui le sezioni non codificanti del DNA possono portare a nuovi codici funzionali per le proteine. Quando il sequenziamento del materiale genetico è progredito fino a permettere il confronto tra interi genomi tra parenti stretti, i ricercatori hanno cominciato a trovare prove della possibilità che i geni scompaiano piuttosto in fretta nel corso dell'evoluzione. E questo li ha spinti a chiedersi se non potessero anche apparire con altrettanta rapidità.

Nel 2006 e nel 2007 David Begun, genetista evolutivo dell'Università della California a Davis, ha pubblicato quelli che molti considerano i primi lavori a sostegno del fatto che certi specifici geni siano emersi de novo nei moscerini della frutta. Gli studi collegavano questi geni alla riproduzione nei maschi: Begun ha trovato che erano espressi nei testicoli e nelle ghiandole che producono il liquido seminale, dove sembrava che la nascita dei geni fosse guidata dalla potente forza evolutiva della selezione sessuale.

Poco prima Mar Albà, studiosa di genomica evolutiva all'Instituto Hospital del Mar de Investigaciones Médicas di Barcellona, aveva mostrato che quanto più un gene è recente, in termini evolutivi, tanto più velocemente tende a evolvere. La scienziata ha ipotizzato che accada perché le molecole codificate dai geni più giovani sono meno raffinate e richiedono ancora qualche messa a punto, e questo potrebbe essere una conseguenza del fatto che quei geni sono emersi de novo: non erano già legati strettamente a una funzione come quelli evolutisi da geni più vecchi. Albà e Begun ricordano che pubblicare i loro primi lavori su questi temi non è stato facile. «C'era tanto scetticismo», dice Albà. «È sorprendente quanto sono cambiate le cose.»

Gli studi iniziano anche a chiarire che cosa fanno i geni de novo. Uno permette alla pianta *Arabidopsis thaliana* di produrre amido, per esempio, e un altro aiuta la crescita delle cellule di lievito. Capire a che cosa servono all'organismo che li ospita dovrebbe essere utile a spiegarne l'esistenza, e il motivo per cui è più vantaggioso crearli da zero invece di evolverli da materiale già esistente. «Non capiremo perché si producono questi geni senza capire quello che fanno», dice Begun.

Geni in attesa

Studiare i geni de novo finisce per essere un misto di genetica ed esperimenti mentali. «Perché il nostro campo è così difficile?», si chiede Anne-Ruxandra Carvunis, dell'Università di Pittsburgh. «Perché c'è una questione filosofica». Centrata su una domanda che Carvunis si fa da dieci anni: che cos'è un gene? Comunemente, un gene è definito come una sequenza di DNA o RNA che codifica per una molecola funzionale. Nel genoma del lievito, però, ci sono centinaia di migliaia di sequenze dette moduli di lettura aperti (*Open Reading Frame*, ORF), che in teoria potrebbero esser tradotti in proteine, ma che i genetisti ritenevano troppo brevi, o di aspetto troppo diverso da quelli degli organismi strettamente imparentati per avere una probabile funzione.

Studiando i moduli del lievito per il suo PhD, Carvunis ha iniziato a sospettare che non tutte queste sequenze fossero dormienti. In uno studio pubblicato nel 2012 è andata a vedere se gli ORF fossero trascritti in RNA e tradotti in proteine: come per i geni, molti di essi lo erano, anche se non era chiaro se le proteine fossero utili al lievito o se fossero tradotte a livelli abbastanza elevati da avere qualche funzione. «E allora, che cos'è un gene? Io non lo so», dice Carvunis. Quello che pensa di aver trovato, però, è «materiale grezzo, un serbatoio, per l'evoluzione».

Alcuni di questi geni «in prova» o, come li hanno chiamati Carvunis e colleghi, protogeni, erano più simili di altri ai veri e propri geni, con sequenze più lunghe e un po' più delle più istruzioni necessarie per passare dal DNA alle proteine. I protogeni potrebbero costituire un fertile campo di prova per l'evoluzione, in cui convertire materiale non codificante in geni veri e propri. «È come lanciarli in versione beta», suggerisce Aoife McLysaght, che lavora sull'evoluzione molecolare al Trinity College di Dublino.

Alcuni ricercatori sono andati oltre le osservazioni e hanno manipolato organismi in modo che esprimessero materiale non codificante. Michael Knopp e colleghi, all'Università di Uppsala, in Svezia, hanno mostrato che inserire e far esprimere ORF generati casualmente in *Escherichia coli* può incrementare la resistenza del batterio agli antibiotici; una sequenza ha prodotto un peptide che aumentava questa resistenza di 48 volte. Con un approccio simile, Diethard Tautz e il suo gruppo al Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie di Plön hanno mostrato che metà delle sequenze rallentava la crescita del batterio, e un quarto sembrava accelerarla; il risultato però è discusso. Questi studi fanno pensare che i peptidi originati da sequenze casuali possano essere sorprendentemente funzionali.

Ma le sequenze casali di DNA possono anche codificare per peptidi «reattivi e maligni, che tendono ad aggregarsi e a fare cose brutte», dice Joanna Masel, biologa evolutiva dell'Università dell'Arizona a Tucson. Esprimere a bassi livelli queste sequenze potrebbe aiutare la selezione naturale a eliminarne porzioni potenzialmente pericolose – quelle che creano proteine disordinate o mal ripiegate – in modo che quello che resta in una specie sia relativamente benigno.

Un gene nuovo di zecca potrebbe aiutare a rispondere a un cambiamento ambientale

Generare geni da regioni non codificanti potrebbe avere qualche vantaggio rispetto ad altri meccanismi, dice Albà. La duplicazione genica è «un meccanismo molto conservatore», dice, e produce proteine ben adattate ma della stessa stoffa dei suoi antenati; i geni de novo, invece, probabilmente producono molecole nettamente diverse. Questo potrebbe ostacolarne l'inserimento in reti ben consolidate di geni e proteine, tuttavia al tempo stesso potrebbe renderle più adatte a compiti nuovi.

Un gene nuovo di zecca potrebbe aiutare un organismo a rispondere a un cambiamento ambientale, per esempio. E proprio questo sembra il caso del merluzzo, che ha acquisito la sua proteina antigelo quando l'emisfero settentrionale si è raffreddato, circa 15 milioni di anni fa.

I tassi di nascita

Per capire quali geni di un organismo siano stati prodotti de novo, i ricercatori hanno bisogno di sequenze esaustive di quell'organismo e dei parenti stretti. Una pianta coltivata che risponde a queste caratteristiche è il riso. La calura di Hainan, un'isola tropicale della Cina meridionale, è l'ambiente ideale per coltivarlo, anche se le condizioni di lavoro possono essere pesanti. «È tremendo», dice Manyuan Long, genetista evolutivo dell'Università di Chicago. Fa tanto caldo «che nella sabbia ci puoi cuocere le uova».

Il gruppo di Long voleva sapere quanti sono i geni emersi de novo nel riso *Oryza sativa japonica*, e quali proteine producano. Quindi hanno confrontato il suo genoma con quelli dei suoi parenti stretti, e con un algoritmo hanno individuato le regioni che contenevano un gene in qualche specie ma ne erano prive in altre. Così hanno potuto identificare il DNA non codificante da cui viene

IN BREVE

Negli ultimi cinque anni alcuni gruppi di ricerca hanno trovato numerosi indizi di geni de novo. **Si tratta di geni nuovi di zecca**, emersi da tratti non codificanti del DNA, e contraddicono la teoria per lungo tempo più accreditata secondo cui i geni emergono solo da geni già esistenti.

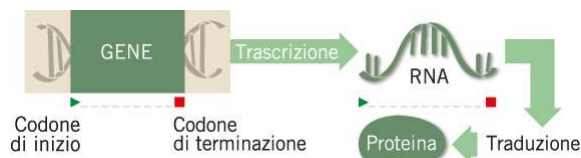
Geni de novo sono stati scoperti in diversi organismi, compresi gli esseri umani. Ora gli scienziati cercano di capirne a fondo la funzione.

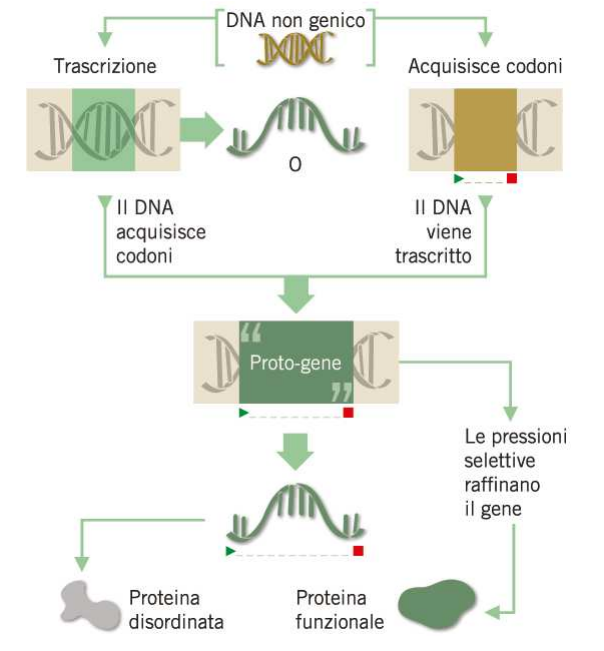
LA NUOVA VISIONE

Nascita di un gene

Da tempo gli scienziati hanno ipotizzato che l'evoluzione produca nuovi geni partendo da quelli vecchi: copiando erroneamente, fondendo o spezzando in frammenti geni già esistenti. Oggi però emergono sempre più esempi di geni creati de novo a partire dalle aride porzioni non codificanti del genoma.

Come funzionano i geni

In genere si considera un gene ogni tratto di DNA che codifica per una molecola utile. Per fare una proteina, il DNA è trascritto in RNA, che poi viene tradotto. Specifici gruppi di tre lettere (codoni) della sequenza dettano quali parti dell'RNA vanno tradotte.

Produzione di un gene de novo

I geni possono evolversi da porzioni non codificanti del DNA, prima venendo trascritti e poi acquisendo codoni, o viceversa. Inizialmente, i prodotti di questi «protogeni» potrebbero essere disfunzionali o disordinati.

PER APPROFONDIRE

***De Novo* Gene Evolution of Antifreeze Glycoproteins in Codfishes Revealed by Whole Genome Sequence Data.** Baalsrud H.T., Jentoft S. e altri, in «Molecular Biology Evolution», Vol 35, n. 3, pp. 593-606, 1° marzo 2018.

Rapid Evolution of Protein Diversity by *de Novo* Origination in Oryza. Zhang L., Long M. e altri, in «Nature Ecology & Evolution», Vol. 3, n. 4, pp. 679-690, 1° aprile 2019.

Evidence for *de Novo* Evolution of Testis-Expressed Genes in the *Drosophila yakuba/Drosophila erecta* Clade. Begun D.J., Jones C.D. e altri, in «Genetics», Vol. 176, n. 2, pp. 1131-1137, 1° giugno 2007.

Illustrazioni di Danilo Sossi; fonte: *Genes from the junkyard*, di Adam Levy, in «Nature», Vol. 574, pp. 314-316, 17 ottobre 2019

il gene in questione e seguire il percorso tramite il quale è diventato appunto un gene. Inoltre gli scienziati hanno contato il numero di geni de novo apparsi: 175 geni in 3,4 milioni di anni di evoluzione. Nello stesso periodo, *Oryza sativa japonica* ha acquisito per duplicazione un numero di geni otto volte più grande.

Lo studio affronta una delle massime difficoltà di chi lavora nel campo: come capire se un gene è veramente de novo. Le risposte variano moltissimo, e sono ancora in via di definizione. Uno dei primi studi, per esempio, ha trovato 15 geni de novo nell'intero ordine dei primati; un tentativo successivo ne ha trovati 60 solo negli esseri umani. Per trovare possibili geni de novo si possono cercare geni simili, tramite un algoritmo, in specie imparentate. Se non viene fuori niente, è possibile che il gene sia comparso de novo. Ma non riuscire a trovarlo non significa che un parente non ci sia: nel tempo il gene potrebbe essere andato perduto, o potrebbe essere cambiato fino a diventare irriconoscibile. Lo studio sul riso ha aggirato il problema identificando in modo esplicito i tratti di DNA non codificante che poi sono diventati geni de novo.

Sui tempi lunghi dell'evoluzione – molto più lunghi dei pochi milioni di anni di evoluzione del riso – è difficile distinguere tra un gene de novo e uno che si è allontanato dai suoi antenati fino a diventare irriconoscibile; determinare il numero assoluto di geni emersi de novo e non per duplicazione «è una domanda quasi senza risposta», dice Tautz.

Per dimostrare quanto possano essere vari i risultati dei diversi metodi, Claudio Casola, genetista evolutivo della Texas A&M University a College Station ha seguito approcci alternativi per analizzare i risultati di alcuni studi precedenti, e non ha trovato conferme per il 40 per cento dei geni de novo in essi proposti. Per Casola, questo sottolinea la necessità di standardizzare i criteri. Attualmente, dice, «sembra tutto molto incoerente».

I conteggi dei geni de novo nel genoma umano sono soggetti alle stesse avvertenze. Ma nei casi in cui ne è stato identificato qualcuno i ricercatori iniziano a esplorarne il ruolo in uno stato di salute o in uno di malattia. Zhang e colleghi hanno trovato che un gene presente solo negli esseri umani è espresso a livelli più alti in persone con il morbo di Alzheimer, e un lavoro precedente aveva collegato certe varianti del gene alla dipendenza da nicotina. Per Zhang, le ricerche che collegano i geni de novo al cervello umano sono molto stimolanti. «Sappiamo che ciò che fa di noi degli esseri umani è il cervello – dice – quindi deve esserci un "kit" di materiali genetici che ha spinto l'evoluzione del nostro cervello». Questo suggerisce una linea di studi futuri. Secondo Zhang si potrebbe studiare questo kit con esperimenti su «organoidi» umani: cellule coltivate per fare da modello di un organo.

I geni de novo possono avere implicazioni anche per la comprensione del cancro. Uno di questi geni – che si trova solo in esseri umani e scimpanzé – è stato collegato alla progressione del tumore in un modello murino di neuroblastoma. E le versioni del papillomavirus umano che provocano il cancro hanno un gene che è assente nelle forme che non causano tumore.

Molti geni de novo sono ancora da caratterizzare, quindi la possibile importanza di questi processi per salute e malattia rimane incerta. «Ci vorrà tempo per capire pienamente in che misura contribuiscono alla salute umana, e fino a che punto hanno contribuito all'origine della nostra specie», dice Carvunis.

Anche se i geni de novo restano un enigma, la loro esistenza rende chiara una cosa: l'evoluzione può facilmente creare qualcosa dal nulla. «Lavorare sui geni de novo – dice Casola – è bello anche perché ci mostra quanto sono dinamici i genomi. ■

Alcune figure scoperte in una grotta in Indonesia sono state datate a 43.900 anni fa, cioè sono significativamente più antiche rispetto a opere paragonabili scoperte in Europa.

ARCHEOLOGIA

La prima storia

Una pittura rupestre scoperta a Sulawesi, in Indonesia, è il più antico esempio noto di arte narrativa

di Kate Wong

Kate Wong è *senior editor* di «Scientific American» per i temi dell'evoluzione e dell'ecologia.

Nella sala numero 67 del Museo Nacional del Prado, a Madrid, il *Saturno* di Francisco Goya affascina i visitatori con una scena abominevole. Il dipinto rappresenta il mito greco di Crono (Saturno per i romani) che divora i propri figli per timore di essere da loro spodestato. Nella versione di Goya, in cui il dio cannibale è rappresentato mentre mangia il figlio con gli occhi spalancati per l'orrore, la vergogna e la follia, i critici hanno visto un'allegoria per le devastazioni della guerra, per la decadenza della società spagnola, per il declino psicologico dell'artista.

Si tratta di uno dei grandi capolavori di arte narrativa di tutti i tempi. Naturalmente sono pochissime le persone che riescono a raggiungere una simile maestria nella narrazione visiva, ma anche nelle sue espressioni meno raffinate questo tipo di espressione creativa ha qualcosa di speciale: a quanto ne sappiamo, solo la nostra specie, *Homo sapiens*, inventa storie e le trasmette attraverso le immagini.

Gli archeologi sono impegnati con zelo nella ricerca delle origini di questo nostro comportamento artistico distintivo. Per molto tempo tutti gli esempi più antichi di arte figurativa (cioè non limitata a segni astratti) e tutte le rappresentazioni di creature immaginarie provenivano da siti in Europa e risalivano a meno di 40.000 anni fa. Però negli ultimi anni i ricercatori hanno scoperto esemplari di arte figurativa più antichi nel Sudest asiatico, e ora alcuni archeologi che lavorano sull'isola di Sulawesi, in Indonesia, hanno individuato l'esempio più antico noto al momento. In un articolo pubblicato a dicembre su «Nature», Maxime Aubert, Adhi Agus Oktaviana e Adam Brumm, tutti della Griffith University, in Australia, e i loro colleghi riferiscono che l'opera, una pittura rupestre, sembra rappresentare diverse figure umane fantastiche che cacciano animali reali. Se hanno ragione, la scoperta potrebbe costituire anche la più antica traccia pittorica di narrazione e pensiero soprannaturale al mondo.

Una scena antica

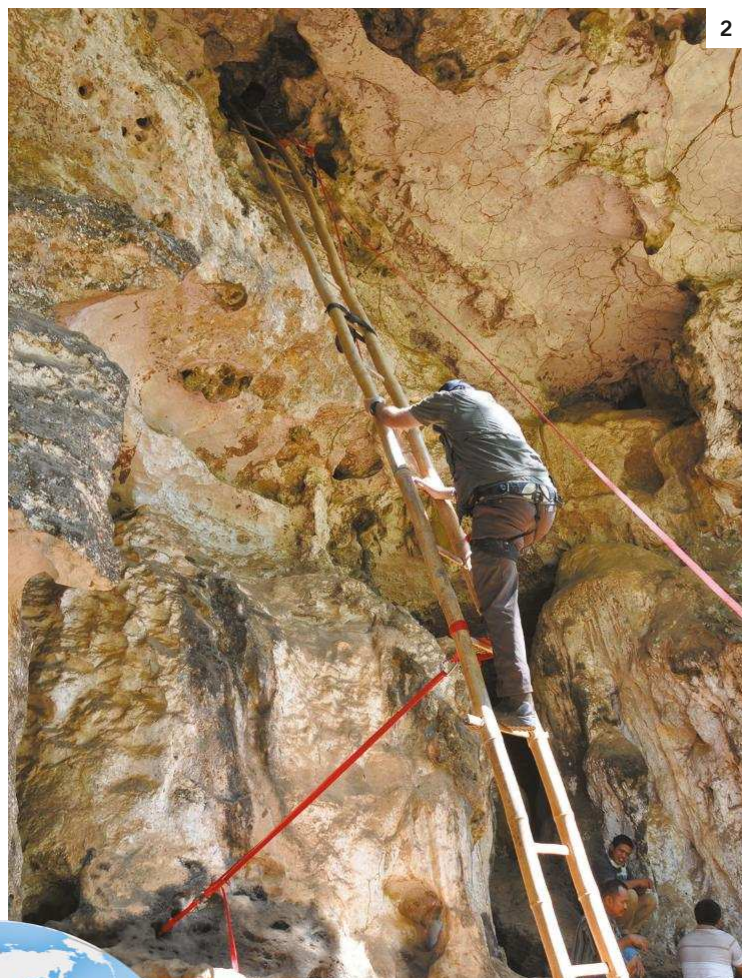
Il gruppo di ricerca ha scoperto questo dipinto preistorico nel 2017 nel sud di Sulawesi, in una grotta denominata Leang Bulu' Sipong 4, nella regione carsica di Maros-Pangkep, una regione spettacolare caratterizzata da torri svettanti e scogliere calcaree. Sulla parete irregolare della grotta, sei minuscoli cacciatori affrontano un grosso bufalo, armati di corde e lance. Nei paraggi, altri cacciatori attaccano altri bufali e anche alcuni maiali. I cacciatori sembrano umani, ma mostrano misteriosi tratti animali, per esempio uno ha una coda e un altro ha il becco. Questi ibridi umano-ani-

IN BREVE

***Homo sapiens* è l'unica specie**, a quanto ne sappiamo, che crea opere d'arte figurativa, si dedica al pensiero spirituale e racconta storie trasmettendole per immagini.

Per anni si è osservato che le tracce più antiche di questa forma di espressione creativa provenivano dall'Europa, il che aveva portato a ritenere che il Vecchio Continente fosse stato una sorta di «scuola di perfezionamento» per la nostra specie.

Una pittura rupestre in Indonesia, che secondo gli scienziati che l'hanno scoperta rappresenta una scena di caccia con elementi soprannaturali, è più antica delle opere paragonabili scoperte in Europa.

Pagine precedenti: Adhi Agus Oktaviana

Una pittura rupestre è stata scoperta da alcuni archeologi in un sito denominato Leang Bulu' Sipong 4, sull'isola di Sulawesi, in Indonesia (*1*). L'ingresso della grotta, molto in alto rispetto al livello del terreno, è di difficile accesso (*2*).

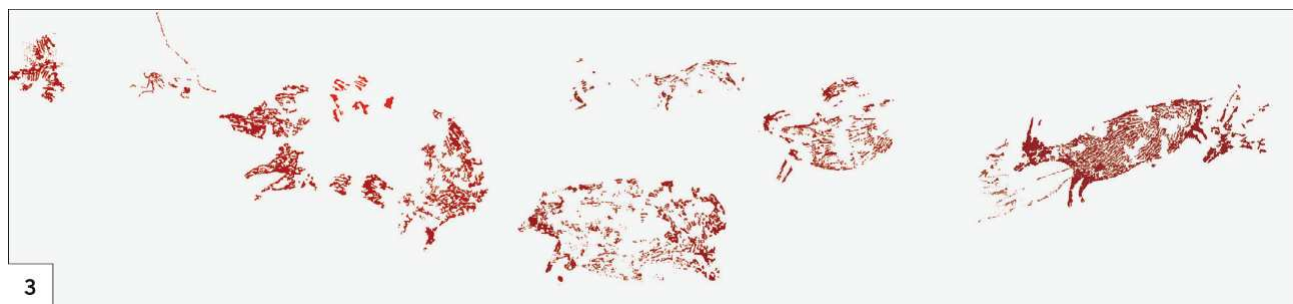
mali si chiamano teriantropi (dalle parole greche che significano «bestia» ed «essere umano») e sono considerati indicatori di pensiero spirituale; ne sono esempi il Minotauro con la testa di toro nella mitologia greca e il dio egizio Anubi, che ha una testa di sciacallo. I ricercatori suggeriscono che le varie figure, disegnate con un pigmento del colore della ruggine vecchia, facciano tutte parte di una stessa scena, che forse rappresenta una tecnica di caccia di gruppo in cui si fa uscire la preda allo scoperto e la si sospinge verso altri cacciatori.

Per datare le immagini, i ricercatori hanno misurato il decadimento radioattivo dell'uranio nei depositi minerali che si sono formati al di sopra di esse. Analizzando campioni di depositi prelevati da varie sezioni della scena, il gruppo di ricerca è arrivato a stabilire date minime che vanno da 43.900 ai 35.100 anni fa. Se il dipinto avesse almeno 43.900 anni, come sostengono Aubert e colleghi, supererebbe di diverse migliaia di anni l'opera che deteneva finora il primato di arte figurativa più antica, un'immagine di un animale simile a una vacca trovata in una grotta nel Borneo e datata a 40.000 anni fa. Supererebbe anche la statuina del *Löwenmensch* («uomo-leone», in tedesco), risalente a 39.000-40.000 anni fa, che fu scoperta in Germania e che a lungo ha vantato il primato di teriantropo più antico, come pure la scena di caccia della famosa grotta di Lascaux in Francia, che risale a 17.000 anni fa.

La collocazione geografica dell'opera è significativa. Anche se gli esperti riconoscono ormai da molto tempo che gli esseri umani ebbero origine in Africa, «un tempo l'Europa era considerata una sorta di "scuola di perfezionamento" dell'umanità», spiega l'archeologa April Nowell, dell'Università di Victoria, in Canada, perché lì erano stati scoperti tutti gli esempi noti di arte e di altri comportamenti complessi. Invece in realtà la distribuzione delle scoperte era solo un riflesso della sproporzione tra la ricerca archeologica effettuata in Europa, soprattutto in Francia, e quella condotta altrove. «Questa nuova scoperta si aggiunge a un insieme già ricco di pitture rupestri antiche e variegate in Indonesia e in Australia, e sottolinea l'importanza di fare ricerche al di fuori dell'Europa», sostiene Nowell.

È interessante anche la posizione della pittura rupestre appena scoperta, in una grotta il cui ingresso si trova a circa 7 metri di altezza, e che di conseguenza è di difficile accesso per i visitato-

Kim Newman (*1*, *2*)

Alcune figure apparentemente teriantropiche (esseri mitologici che sono in parte umani e in parte animali) sembrano cacciare un piccolo bufalo endemico della zona (*1*) in una sezione della pittura rupestre. Anche se le figure sono state parzialmente cancellate dal tempo, un'immagine composita dell'intera superficie della pittura rupestre (*2*) e una sua riproduzione tracciata (*3*) mostrano altre figure teriantropiche, diversi bufali e anche qualche maiale selvatico. Alcuni campioni prelevati dai depositi minerali che si sono formati sopra le immagini sono stati datati con il metodo che misura il decadimento radioattivo dell'uranio. I risultati indicano date minime che vanno dai 43.900 ai 35.100 anni fa.

Ratno Sardi (*1*); Adhi Agus Oktaviana, Ratno Sardi E Adam Brumm (*2, 3*)

ri moderni senza l'aiuto di una scala o di attrezzatura per l'arrampicata. In Europa le pitture rupestri si trovano spesso in passaggi profondi e completamente bui, in cui era difficile arrivare o lavorare, il che suggerisce che quei luoghi potessero avere un significato speciale per gli artisti. Brumm nota che a Sulawesi le immagini antiche si trovano principalmente nelle vicinanze degli ingressi di grotte e ripari rupestri, cioè nella zona illuminata, non in quella buia. Però, come nel caso di Leang Bulu' Sipong 4, furono create in grotte e nicchie difficili da raggiungere, in posizioni elevate nelle torri calcaree e nelle pareti delle scogliere a strapiombo.

«A parte i dipinti, questi siti non mostrano altre tracce di presenza umana, e presumiamo che fossero frequentati dalle popolazioni antiche solo per realizzarvi le immagini», spiega Brumm. «Non sappiamo il perché. Ma forse creare pitture rupestri in posti così elevati, inaccessibili e liminali aveva qualche significato culturale e simbolico più profondo». L'archeologo aggiunge che per arrivare in questi posti è probabile che gli artisti dovessero arrampicarsi su liane, o magari su pali di bambù, o in alcuni casi farsi strada in una rete di passaggi tra le grotte all'interno delle torri carsiche. Però, anche se gli artisti preistorici di Sulawesi e i loro simili in Europa potrebbero aver scelto entrambi luoghi pieni di significato per realizzare le loro opere e usato alcune convenzioni stilistiche simili nel ritrarre i loro soggetti, «è improbabile qualsiasi collegamento storico o culturale diretto tra le rappresentazioni

di animali realizzate durante l'era glaciale in Indonesia e in Europa», commenta Brumm.

In effetti, anche se l'opera appena scoperta potrebbe significare che il primo esempio di arte figurativa, teriantropica e narrativa risale a una data più antica, rivela ben poco della spinta che portò alla comparsa di questa espressione creativa. Per decenni gli studiosi si sono interrogati su quello che sembrava un grosso ritardo tra l'emergere dell'anatomia umana moderna e l'avvento di comportamenti umani moderni come l'arte. Se l'anatomia moderna si è evoluta centinaia di migliaia di anni fa, gli elementi dei comportamento moderno, rivelati dalla cultura materiale preservata nei reperti archeologici, si sono uniti tra loro parecchio più tardi. Qualcuno ha ipotizzato che un salto cognitivo tardivo abbia dato nuova forza all'ingegno dei nostri antenati. Altri suppongono che siano stati fattori culturali, sociali o ambientali, o qualche combinazione di questi, ad accenderne il fuoco creativo. «Purtroppo questo esemplare di arte rupestre che abbiamo datato non dà alcuna risposta diretta a questa domanda», commenta Brumm, il quale però, in base alle prove disponibili, sospetta che l'arte di raccontare storie sia emersa molto prima della pittura, «forse addirittura prima che la nostra specie si diffondesse fuori dell'Africa».

Il dipinto potrebbe gettare luce anche su altri aspetti della psiche dei nostri predecessori. «Una delle caratteristiche più interessanti di noi esseri umani – spiega Nowell – è una potente memoria di lavoro, che ci permette di pianificare il futuro, di visualizzare mentalmente una sequenza di eventi prima di metterla in pratica e, naturalmente, di raccontare storie». L'archeologa sottolinea che Polly Wiessner, antropologa dell'Università dello Utah, ha dimostrato come in molte società moderne di cacciatori-raccoglitori le persone parlino di cose diverse a seconda dell'ora: durante il giorno tendono a scambiare pettegolezzi o a discutere di questioni economiche o politiche, mentre di notte raccontano storie e cantano canzoni.

«Storie e canzoni sono quello che unisce le persone», fa notare Nowell. «Questa pittura rupestre suggerisce che la tradizione di raccontare storie risalga a decine di migliaia di anni fa. Le storie possono parlare di eventi reali o mitologici, possono insegnare e divertire allo stesso tempo». Anche se probabilmente non sapremo mai che cosa raccontava l'esemplare dipinto a Sulawesi, «raccogliendo queste storie, queste scene, iniziamo a sviluppare la nostra comprensione su che cosa fosse importante per quelle persone in quel momento e in quel luogo», aggiunge l'archeologa.

«Una delle caratteristiche più interessanti di noi esseri umani è una potente memoria di lavoro, che ci permette di pianificare, di visualizzare mentalmente una sequenza di eventi prima di metterli in pratica e, naturalmente, di raccontare storie»

April Nowell, Università di Victoria

Domande aperte

Per quanto riguarda gli autori delle immagini di Leang Bulu' Sipong 4: non sono stati trovati resti di scheletri umani risalenti a quel periodo né in quella grotta né in alcun altro luogo di Sulawesi. Sappiamo che oltre a *H. sapiens* creavano arte anche altre specie umane, per esempio l'uomo di Neanderthal, anche se finora sembra che la loro arte fosse esclusivamente di tipo astratto. Sappiamo anche che nel Sudest asiatico in un passato non troppo lontano vivevano altre specie umane: *H. floresiensis* risiedeva sull'isola indonesiana di Flores 60.000 anni fa, *H. luzonensis* viveva nelle Filippine appena 50.000 anni fa e uno studio genetico ha concluso che in Indonesia o in Nuova Guinea uno degli ultimi gruppi dei denisoviani potrebbe essersi incrociato con *H. sapiens* solo 15.000 anni fa. Quando gli si chiede se la scena di caccia possa essere stata dipinta da una di queste altre specie, Brumm risponde: «Data la natura sofisticata delle immagini, la nostra ipotesi di lavoro è che queste pitture rupestri siano opera di esseri umani moderni, persone che avevano essenzialmente la stessa nostra "architettura" cognitiva. Si presume che questa popolazione si fosse stabilita a Sulawesi nella prima ondata migratoria di *H. sapiens* in Indonesia, almeno 70.000-50.000 anni fa».

Però il livello di complessità delle immagini è oggetto di qualche controversia. Paul Pettitt, archeologo dell'Università di Durham, nel Regno Unito, un esperto di arte preistorica che non ha collaborato al nuovo studio, sottolinea che anche se uno degli animali rappresentati ha almeno 43.900 anni, gran parte delle altre figure non sono state datate. «Le "scene" sono molto rare nell'arte del Pleistocene», sottolinea. «Se fosse in Europa, in Africa o in Nord America, risalirebbe a non più di 10.000 anni fa». Pettitt fa notare anche che i cosiddetti teriantropi sono fuori scala rispetto agli animali che starebbero cacciando. «Magari non sono collegati agli animali?», si chiede. O magari sono stati dipinti molto più tardi? «Sappiamo che in Europa le "grotte dipinte" furono decorate in diverse fasi separate tra loro da migliaia di anni», afferma. Si potrebbe fare un'analisi geochimica dei pigmenti usati per stabilire con sicurezza se le immagini di Leang Bulu' Sipong 4 siano tutte della stessa epoca.

Inoltre, Pettitt non è neanche convinto che i cacciatori siano teriantropi, e neanche simili a esseri umani. «Alcuni sono vaghi e sicuramente in dubbio», sostiene. «Anche gli esempi più chiari potrebbero essere quadrupedi», aggiunge, sottolineando come le figure siano state rappresentate in orizzontale. E quelle che dovrebbero essere lance non sono altro che «linee lunghe che passano solo vicino ad alcuni degli "umani", è difficile affermare con sicurezza che siano armi», afferma. «Dunque resta una questione aperta se il dipinto rappresenti esseri umani e, qualora si tratti di una scena, se sia una scena di caccia».

Studi futuri potranno portare risposte definitive. Il gruppo che ha fatto questa scoperta ha individuato nella regione molti altri siti con pitture figurative che non sono ancora state datate. Forse potranno darci nuove indicazioni sull'origine della mente umana moderna con la sua capacità di creare immagini, narrare storie e inventare miti. ■

PER APPROFONDIRE

Earliest Hunting Scene in Prehistoric Art. Aubert M. e altri, in «Nature», Vol. 576, n. 778, pp. 442-445, 19 dicembre 2019.

La nascita delle culture umane. D'Errico F. e Chikhi L., in «Le Scienze» n. 609, maggio 2019.

Che cosa sta uccidendo

le farfalle monarca?

ETOLOGIA

Sembrava così semplice: il diserbante Roundup stava distruggendo una delle farfalle più amate d'America. E invece, nuove evidenze hanno alimentato un urgente dibattito su altre possibili cause

di Gabriel Popkin

Gabriel Popkin è un giornalista scientifico di Mount Rainier, nel Maryland (Stati Uniti).

Karen Oberhauser si stava arrampicando su una montagna un centinaio di chilometri a nord-ovest di Città del Messico quando cominciò a temere per il futuro della farfalla monarca. Era l'inverno del 1996-1997, e lei, ecologa all'epoca all'Università del Minnesota e più abituata ai piatti bassopiani del Midwest degli Stati Uniti, ansimava senza fiato lungo la ripida salita in quota.

L'aria era così sottile da darle il mal di testa, ma quando si fermò per guardarsi intorno vide milioni di farfalle monarca avvolgere come gioielli viventi gli abeti che abbracciavano i pendii. Quasi tutta la popolazione mondiale di farfalle monarca era stipata in quel punto e in poche foreste vicine: un totale di appena 18 preziosi ettari. Gli scienziati che le studiano conoscevano il luogo, ma era la prima volta che Oberhauser lo visitava. Pensò che una forte tempesta o il disboscamento illegale avrebbero potuto raderlo al suolo. Ricorda di «aver capito quanto sono incredibilmente vulnerabili».

Quella foresta è il punto d'inizio di un'eccezionale migrazione che ogni anno, durante l'estate, conduce le farfalle monarca verso nord, fino in Canada, e le riporta in Messico l'inverno successivo. Lungo la strada si riproducono e si nutrono nei campi coltivati del Midwest, dove abita l'ecologa. Che negli anni successivi alla sua visita alla foresta messicana cominciò a sospettare che la sua regione fosse diventata un altro punto critico per le farfalle monarca. Gli agricoltori stavano irrorando i campi della zona con il pesticida Roundup per annientare molte piante moleste. Il diserbante, tuttavia, uccide anche qualcosa di prezioso per la farfalla monarca: le piante succulente del genere *Asclepias*, le asclepiadi, su cui le farfalle adulte depongono le uova e che per i bruchi è l'unica fonte di cibo. Con i colleghi, Oberhauser cominciò a contare le piante e le uova, concludendo che un numero minore di asclepiadi nei campi implicava meno uova e, di conseguenza, meno farfalle adulte che tornavano in Messico. Nel 2012 fu coautrice di un articolo che annunciava la «ipotesi della limitazione delle asclepiadi» e la sua preoccupante implicazione: il Roundup stava mettendo in pericolo la grande migrazione della farfalla monarca.

L'ipotesi galvanizzò l'opinione pubblica e molti esperti di farfalle monarca. Aveva senso: una fonte di cibo fondamentale stava svanendo proprio mentre in Messico la popolazione delle farfalle stava crollando. Nell'inverno del viaggio di Oberhauser le farfalle erano circa 300 milioni, ma appena dieci anni più tardi erano diventate meno di 100 milioni. Il rimedio, secondo Oberhauser e altri, era piantare asclepiadi in grandi quantità per compensare le perdite. All'appello risposero migliaia di cittadini appassionati di conservazione ambientale. Michelle Obama piantò asclepiadi in un giardino della Casa Bianca. Gruppi ambientalisti rivolsero una petizione allo U.S. Fish and Wildlife Service per inserire la farfalla monarca, *Danaus plexippus plexippus*, nell'elenco delle specie minacciate, così da proteggerne meglio l'habitat.

Da allora, tuttavia, la teoria delle asclepiadi ha cominciato a mostrare diverse lacune dal punto di vista scientifico. I censimenti della farfalla monarca negli Stati Uniti, sia durante sia dopo la stagione estiva della riproduzione, non hanno rivelato alcun declino costante mentre in Messico i numeri scendevano vertiginosamente. E, secondo altri dati, molte farfalle messicane provenivano da regioni degli Stati Uniti senza molti campi impregnati di Roundup. Gli scienziati più scettici dissero che gli insetti non avevano problemi a riprodursi nei climi settentrionali, ma qualcosa li stava eliminando lungo la strada verso il Messico. «La migrazione è simile a una maratona», sostiene Andrew Davis, professore di ecologia all'Università della Georgia. «Se il numero di persone che iniziano la maratona è più o meno sempre lo stesso negli ultimi vent'anni, ma il numero di quelle che tagliano il traguardo è diminuito, non concludiamo che il numero di persone si sta riducendo, ma che sta succedendo qualcosa durante la corsa».

L'identità di questo qualcosa, tuttavia, resta un mistero elusivo e preoccupante. Secondo alcuni dati, la natura ha perso piante nettarifere di cui si nutrono le farfalle monarca adulte durante il loro viaggio verso sud, cosa a cui si aggiunge il deterioramento delle importantissime foreste al termine della rotta migratoria. Gli scienziati hanno anche ipotizzato che il responsabile della riduzione degli insetti migratori possa essere un'infezione parassitaria. Per inciso, recentemente si è ridotta anche una popolazione più piccola di farfalle monarca, che trascorre l'inverno lungo la

IN BREVE

Quando il Roundup uccise le asclepiadi nei terreni agricoli, all'inizio di questo secolo, gli scienziati incolparono il diserbante della netta riduzione che si osservava nelle popolazioni di farfalle monarca.

Sono però emersi altri sospetti, per esempio i cambiamenti in corso nelle foreste meridionali, dove gli insetti migrano ogni anno.

Al momento gli scienziati, preoccupati per il destino dell'amatissima farfalla, stanno discutendo su quale sia la vera minaccia e come si possa fermarla.

Pagine precedenti: Ingo Arndt/Nature Picture Library

Le farfalle monarca hanno bisogno delle asclepiadi per riprodursi. Gli esemplari adulti depongono le uova sulle piante (1), mentre i bruchi che nascono da queste uova si nutrono soltanto di asclepiadi (2).

Ingo Arndt/Nature Picture Library (1); Doug Wechsler/Nature Picture Library (2)

costa californiana; gli entomologi sono preoccupati per quest'altro gruppo, ma il suo habitat non si sovrappone a quello della popolazione orientale e, di conseguenza, gli scienziati pensano che le cause di questa diminuzione siano probabilmente diverse.

Praticamente tutti sono d'accordo sul fatto che, nel complesso, nonostante picchi o flessioni che variano da un anno all'altro, la popolazione che sverna in Messico ha continuato a scemare per la maggior parte degli ultimi trent'anni. Non si tratta di una buona notizia per le farfalle monarca, ma che fare? Dipende dalle cause. Oberhauser e i suoi sostenitori continuano ad affermare che il nemico principale è la perdita delle asclepiadi. Altre prove, tuttavia, complicano e confondono le acque di una storia che un tempo sembrava ovvia, con un candidato ideale al ruolo del cattivo. E questo significa anche che aiutare gli insetti è diventato più complicato.

Da sud a nord e ritorno

Il primo resoconto certo sugli spostamenti in massa delle farfalle monarca risale al 1857, quando un naturalista descrisse la comparsa nella Mississippi Valley di farfalle «in numeri così vasti da formare nugoli che oscuravano l'aria circostante».

Col tempo, i biologi impararono che quando arriva la primavera, lì come in altre parti del Nord America, le femmine della farfalla monarca si posano su oltre 70 specie di asclepiadi per nutrirsi e deporre le uova. Una femmina adulta può deporre fino a 500 uova e, quando ha finito, muore. Dalla schiusa delle uova emergono bruchi che diventano farfalle e il ciclo si ripete quattro o cinque volte ogni anno.

Le farfalle monarca che svernano in Messico volano a nord e depongono le uova in primavera vicino al confine con il Texas. La loro prole vive tra due e sei settimane producendo generazioni che si spostano verso gli Stati del Midwest e del sud, per poi finire nella regione dei Grandi Laghi, nel New England e in Canada. In autunno, quando le giornate si accorciano, fa capolino l'ultima generazione di farfalle, detta «super generazione». Questi insetti possono sopravvivere fino a otto mesi, perché il loro metabolismo rallenta e non sprecano preziose energie per riprodursi. Dalle alte latitudini viaggiano verso sud diretti in Messico, coprendo fino a 160 chilometri al giorno. All'inizio di dicembre le farfalle che sono sopravvissute si accalcano sugli abeti messicani, dove vivono fino all'inizio della primavera, quando intraprendono il viaggio verso nord e, grazie ai loro discendenti, l'odissea continua.

Sul finire degli anni settanta i biologi scoprirono le minuscole foreste lungo le pendici dei monti messicani in cui svernavano le farfalle monarca. Lincoln Brower, che lavorava come biologo presso l'Amherst College e poi all'Università della Florida, aiutò a convincere i funzionari messicani a porre sotto tutela queste foreste, lanciando il movimento per la protezione delle farfalle monarca.

All'inizio di questo secolo Oberhauser e John Pleasants, un ecologo della Iowa State University, scoprirono un altro habitat fondamentale per questi insetti: i terreni agricoli dell'Iowa e di altri stati del Midwest, dove le comuni asclepiadi che crescevano tra i filari erano punteggiate di uova di farfalle monarca. A quanto pareva, i campi coltivati erano un gigantesco vivaio. «Fu una rivelazione», commenta Oberhauser. «Capimmo quanto può essere importante l'agricoltura, che avevamo sempre considerato una landa desolata dal punto di vista della biodiversità».

I successivi sopralluoghi dei due ricercatori rivelarono che, in quei campi coltivati, le asclepiadi ospitavano fino a quattro volte tanto le uova deposte su quelle presenti nei terreni incolti o lasciati a riposo per scopi conservativi. Come disse Pleasants: «Attiravano le farfalle monarca come calamite».

I terreni agricoli degli Stati Uniti, tuttavia, stavano per andare incontro a una ripulitura ecologica senza precedenti. La multinazionale di biotecnologie agrarie Monsanto aveva prodotto piante di mais e soia modificate, con un gene che consentiva loro di sopravvivere all'esposizione al diserbante glifosato, meglio noto con il nome commerciale Roundup. Questo significava che il Roundup poteva essere spruzzato generosamente, lasciando intatte le redditizie coltivazioni ma uccidendo qualsiasi altra cosa crescesse nei campi. Per gli agricoltori, il mais e la soia «Roundup

Ready», a prova di Roundup, erano una manna, ma per le piante che occupavano lo spazio tra i filari erano una condanna a morte. Nel 2007, praticamente tutta la soia e oltre metà del mais coltivato negli Stati Uniti era ormai Roundup Ready.

Sulla base dei dati raccolti in Iowa, Pleasants e Oberhauser avevano stimato che nel Midwest, tra il 1999 e il 2010, il numero complessivo di asclepiadi era diminuito del 58 per cento. Brower e colleghi avevano riferito che, in quell'arco di tempo, le popolazioni di farfalle monarca che svernavano in Messico si erano ridotte vertiginosamente. Durante l'inverno 2009-2010, in effetti, l'area forestale messicana occupata dagli insetti era più che dimezzata rispetto all'anno precedente, scendendo per la prima volta (da quando era iniziata la raccolta dei dati, all'inizio degli anni novanta) a meno di due ettari. Il legame tra le due tendenze sembrava inevitabile e spinse Pleasants e Oberhauser a pubblicare il loro storico articolo del 2012, in cui sostenevano che la perdita di asclepiadi stava uccidendo le farfalle monarca. Oberhauser parlò di «prove inconfutabili».

Se l'articolo fosse stato su un altro insetto, se ne sarebbe accorta solo una manciata di scienziati specializzati. La farfalla monarca, però, occupa un posto speciale nei cuori delle persone che abitano le tre nazioni del Nord America: il suo colore arancione brillante, le grandi dimensioni, le aggraziate circonvoluzioni in volo e, soprattutto, la sua migrazione spettacolare hanno reso la farfalla monarca una celebrità molto amata.

Senza contare che nella storia c'era un cattivo che il pubblico era già pronto a odiare. Il produttore del diserbante Roundup, la Monsanto (che oggi fa parte del gruppo Bayer), incarnava paure molto diffuse relative all'ingegneria genetica e al controllo dell'agricoltura da parte delle multinazionali. L'ipotesi che il prodotto simbolo della Monsanto stesse uccidendo l'insetto simbolo di tutta l'America era da prima pagina. La notizia dell'idea di Oberhauser e Pleasants fu ampiamente diffusa dai mezzi di comunicazione statunitensi, compresa questa rivista.

Si mobilitò un esercito di conservazionisti. Nel 2014 in tutti gli Stati Uniti erano spuntate più di 10.000 «stazioni di passaggio per le farfalle monarca», grazie a un programma di piantumazione di asclepiadi condotto da Orley «Chip» Taylor, ecologo degli insetti dell'Università del Kansas. Negli anni seguenti il presidente Barack Obama e le sue controparti messicana e canadese promisero tutti di proteggere la farfalla, e pochi mesi dopo la First Lady fu immortalata mentre, insieme ad alcuni bambini, piantava asclepiadi in un apposito giardino per l'impollinazione.

Conti che non tornano

Eppure, mentre l'ipotesi della limitazione delle asclepiadi guadagnava il sostegno del pubblico, alcuni scienziati sospettavano che le sue basi fossero inconsistenti. Uno dei primi a esprimere dubbi fu Davis, l'ecologo della Georgia. Aveva analizzato i conteggi delle farfalle monarca finite in un paio di «imbuti» durante il loro viaggi di fine estate verso il Messico: Peninsula Point, sulla riva occidentale del Lago Michigan, e Cape May, nel New Jersey, una piccola striscia di terra compresa tra l'Oceano Atlantico e la Delaware Bay. In entrambi i luoghi per molti decenni, gruppi di volontari avevano contato gli insetti e gli uccelli diretti a sud alla fine dell'estate. Nel caso delle farfalle monarca, Davis notò che i numeri non mostravano un declino stabile, ma salivano e scendevano da un anno all'altro, con un andamento tipico delle popolazioni di insetti.

L'articolo di Davis non ottenne molta attenzione quando fu pubblicato, nel 2012, e Oberhauser e Pleasants notarono che gli imbuti si trovavano a nord e a est della *Corn belt* (la fascia in cui si coltiva il mais); di conseguenza non era possibile che mostrassero gli effetti delle perdite di asclepiadi nei terreni agricoli del Midwest. «Nessuno voleva sentirsi dire che le farfalle monarca non stavano diminuendo, per quanto folle possa suonare», commenta Davis.

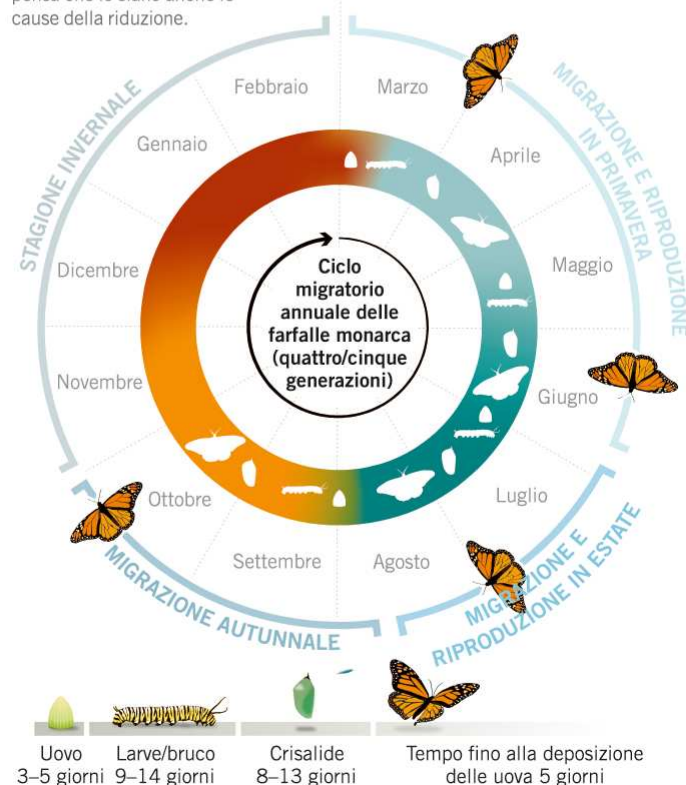
L'articolo attirò l'attenzione di Anurag Agrawal, un ecologo evoluzionista della Cornell University che aveva studiato il modo in cui le farfalle monarca usano le sostanze prodotte dalle asclepiadi. Anche Agrawal cominciò a sospettare che la storia di Pleasants e Oberhauser, per quanto chiara e convincente, fosse troppo semplice per spiegare la dinamica delle popolazioni di un insetto che attraversa un territorio vasto e variegato. Nello Stato di New York da cui proviene Agrawal, per esempio, i terreni agricoli sono circondati da prati, pascoli e altri ecosistemi. Gli sembrava che, anche se le asclepiadi fossero scomparse dai filari delle coltivazioni, ci sarebbero stati molti altri luoghi in cui le farfalle monarca potevano trovare delle piante.

Ma, racconta Agrawal, questo punto di vista non fu apprezzato da tutti. Durante un convegno organizzato nel 2012 da Oberhauser all'Università del Minnesota, chiese ad alcuni partecipanti che cosa pensassero dell'articolo di Davis. Agrawal ricorda che Chip Taylor lo afferrò per un braccio e gli chiese di non insinuare che il declino delle farfalle monarca fosse esagerato, perché avrebbe compromesso gli sforzi di conservazione. Taylor dice di non ricordare l'incontro e di dubitare che abbia mai avuto luogo.

«Nessuno voleva sentirsi dire che le farfalle monarca non stavano diminuendo, per quanto folle possa suonare»

Andrew Davis, Università della Georgia

Le perplessità di Agrawal e Davis, tuttavia, erano condivise da altri scienziati. Leslie Ries, professore di ecologia alla Georgetown University, anche lui presente al convegno, esaminò i dati di un gruppo di monitoraggio della North American Butterfly Association (NABA). I volontari del gruppo vanno in luoghi selezionati e registrano tutte le farfalle che vedono in un giorno in un'area di 24 chilometri di diametro. In un articolo del 2015 Ries ha riferito che queste serie di dati (come un'altra specifica dell'Illinois) non davano alcuna indicazione che nel nord degli Stati Uniti la popolazione delle farfalle monarca fosse diminuita nei 21 anni precedenti.

Agrawal è andato ancora oltre, raccogliendo numerosi conteggi di lungo periodo effettuati sugli insetti in diversi momenti del ciclo vitale, tra cui i dati sullo svernamento, quelli della NABA e quelli degli imbuti. Il ricercatore, come molti colleghi, voleva capire se le stime della popolazione in una fase potevano prevedere quelle della fase successiva – una catena di connessioni fondamentale per il ragionamento secondo cui meno asclepiadi nel Midwest d'estate portavano a meno farfalle in Messico d'inverno. Prima nel 2016 sulla rivista «Oikso» e poi nel 2018 su «Science», sono usciti articoli che osservavano che verso la fine di questa catena c'era una grossa falla: gli ultimi conteggi di fine estate non erano predittivi delle popolazioni invernali. I conteggi estivi restavano più o meno costanti

Alti e bassi della farfalla monarca

Ogni anno milioni di farfalle monarca volano dalla loro casa invernale sulle montagne messicane ai campi nelle regioni orientali di Stati Uniti e Canada, in cui si riproducono d'estate. La popolazione invernale si è assottigliata in modo allarmante. Inizialmente, gli scienziati hanno dato la colpa alla perdita di asclepiadi - le piante dove le farfalle depongono le uova nel Midwest – dovuta all'uso di un diserbante. Dati recenti, però, mostrano che queste popolazioni crescono e diminuiscono, spingendo alcuni ecologi a suggerire che la vera minaccia sia altrove. Altri restano invece convinti che il problema sia la scomparsa delle asclepiadi.

CANADA

STATI UNITI

Farfalle monarca orientali

Farfalle monarca occidentali

Generazioni del Midwest

Generazioni dell'area nord-orientale

Golfo del Messico

MESSICO

Un gruppo di farfalle monarca resta a ovest delle Montagne Rocciose e sverna lungo le coste della California. Di recente questa popolazione è precipitata da qualche milione di individui a circa 30.000. Ma essendo il loro habitat diverso da quello delle farfalle orientali, si pensa che lo siano anche le cause della riduzione.

Riserva per le farfalle che svernano (foresta di pini, Michoacán, Messico)

Migrazione e riproduzione in primavera/estate

1° generazione

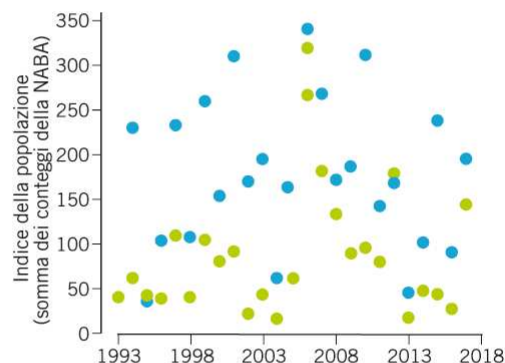
2° generazione

3° generazione

? Possibile 4° generazione

Migrazione autunnale

Super generazione invernale

Fluttuazioni delle dimensioni delle popolazioni del Midwest e del Nord-est

Tendenza al ribasso della dimensione della popolazione invernale

STAGIONE INVERNALE

MIGRAZIONE E RIPRODUZIONE IN PRIMAVERA

MIGRAZIONE E RIPRODUZIONE IN ESTATE

MIGRAZIONE AUTUNNALE

Gennaio

Febbraio

Marzo

Aprile

Maggio

Giugno

Luglio

Agosto

Settembre

Ottobre

Novembre

Dicembre

Ciclo migratorio annuale delle farfalle monarca (quattro/cinque generazioni)

Uovo 3–5 giorni

Larve/bruco 9–14 giorni

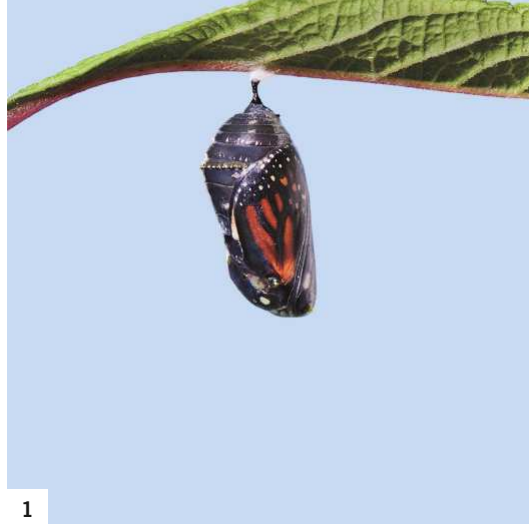
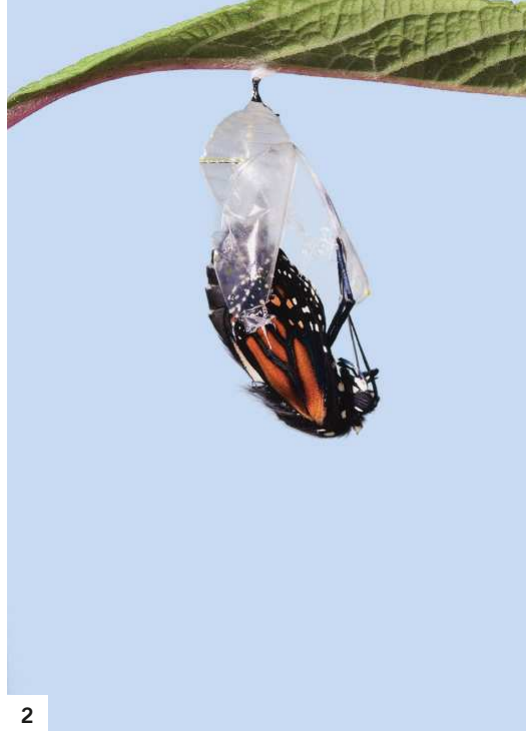
Crisalide 8–13 giorni

Tempo fino alla deposizione delle uova 5 giorni

Una generazione sopravvive circa un mese, fatta eccezione per la super generazione invernale, che arriva fino a otto mesi.

Tendenze e stagioni diverse

Dal 1993, secondo i calcoli dell'ecologo della Cornell University Anurag Agrawal e colleghi, i conteggi estivi delle farfalle monarca nel Midwest e negli Stati Uniti nord-orientali mostrano un susseguirsi di picchi e avvallamenti. I cicli spingono gli scienziati a pensare che la perdita delle asclepiadi non abbia minacciato le farfalle estive, ma i conteggi relativi al piccolo rifugio invernale di questi insetti, in Messico, indicano una tendenza al ribasso. Per inciso, questo secondo gruppo negli ultimi tre anni si è un po' ripreso, ma non ha recuperato l'abbondanza storica. Tutto questo indica la presenza di un problema – forse la perdita di foreste o di piante nettarifere – più vicino all'estremità meridionale del tragitto coperto dal lepidottero.

Grafica di Nigel Hawtin; fonti: AGRAWAL A.A. e INAMINE H., Mechanisms behind the Monarch's Decline, in «Science», vol. 360, giugno 2018; World Wildlife Fund, Messico (dati sulla popolazione invernale del 2018); Journey North Citizen Science Project, Orto botanico dell'Università del Wisconsin-Madison (ciclo annuale).

Dopo circa dieci giorni, dalla crisalide emerge una farfalla adulta. Prima preme contro il sottile contenitore (1), poi si spinge fuori (2). Alla fine la nuova farfalla dispiega le ali (3, 4). Ogni anno ci sono da quattro a cinque generazioni di farfalle.

anche quando quelli invernali precipitavano. Come Davis, Agrawal e i suoi coautori pensavano che qualcosa stesse decimando le farfalle monarca durante la migrazione autunnale verso sud, qualcosa che sembrava più importante degli eventi che avevano luogo durante la stagione riproduttiva estiva.

Uno studio di tipo diverso ha dato agli scettici ancora più armi. Nel 2017 Tyler Flockhart, biologo delle popolazioni all'Università di Guelph, nell'Ontario, ha cercato di stabilire non perché le farfalle stessero morendo, ma da dove provenissero. Ha analizzato isotopi di idrogeno e carbonio in oltre 1000 farfalle monarca raccolte in Messico nel corso di quarant'anni. Questi isotopi si trovano in rapporti variabili in diverse regioni e sono assorbiti dai corpi e dalle ali degli insetti, formando una sorta di firma geografica che indica dove si erano nutrite le farfalle giunte in Messico per l'inverno. Flockhart ha concluso che il Midwest era il punto di partenza per appena il 38 per cento dei lepidotteri diretti in Messico. Le farfalle provenivano in gran numero anche dalle regioni degli Stati Uniti nordorientali e meridionali e dal Canada centrale e orientale, dove mais e soia occupano una percentuale di terreno molto inferiore.

Non i soliti sospetti

Dal punto di vista di Agrawal e Davis, Flockhart ha fornito più prove per confutare l'ipotesi della limitazione delle asclepiadi. Se meno di due farfalle monarca su cinque provenivano dalla Corn Belt, come era possibile che una perdita di asclepiadi in quella regione fosse responsabile della decimazione in Messico?

Flockhart è più cauto. Anche se è possibile che nel Nord America ci siano ancora abbastanza asclepiadi per mantenere in salute una popolazione di farfalle monarca, il biologo sospetta che l'uso di Roundup possa aver cambiato la distribuzione delle piante in modi potenzialmente nocivi. Se l'effetto del diserbante è stato quello di concentrare le asclepiadi in aree più piccole, esterne ai campi coltivati, è possibile che le femmine del lepidottero abbiano dovuto deporre tutte le uova una attaccata all'altra, costringendo più bruchi a competere per lo stesso cibo e, suggerisce Flockhart, stressando eccessivamente la popolazione.

Questa ipotesi sottolinea un problema per gli oppositori alla teoria delle asclepiadi. Non basta trovare falle nell'ipotesi della limitazione: per convincere gli scienziati che sta succedendo qualcosa di diverso, dovevano individuare un altro colpevole, ma non avevano alcuna alternativa concreta.

La situazione è cambiata nella primavera del 2019, quando un diverso gruppo di ricercatori ha trovato due possibili sospetti: danni alle piante nettarifere lungo la rotta migratoria e cambiamenti della densità delle foreste messicane. In un articolo pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», un gruppo guidato da Elise Zipkin, ecologa della Michigan State University, ha esaminato le correlazioni statistiche tra le dimensioni delle popolazioni delle farfalle monarca in momenti diversi dell'anno e una vasta gamma di dati ambientali. È stata la prima ricerca a dividere le farfalle invernali in 19 colonie, anziché raggruppare insieme tutte le aree forestali. È emerso così che le colonie con una copertura forestale più densa ospitano più farfalle.

Il gruppo di Zipkin ha anche usato immagini satellitari per quantificare la presenza di materiale vegetale vivente in un territorio. Quando gli Stati Uniti meridionali in autunno erano più verdi, in Messico arrivavano più farfalle; quando erano più marroni, come succede in periodi di siccità, ne arrivavano meno. Questo andamento, secondo i ricercatori, è dovuto al fatto che piante più verdi e più sane producono più nettare per alimentare le farfalle monarca durante la migrazione. E tra il 2010 e il 2013, proprio quando in Messico la popolazione delle farfalle monarca toccava il fondo, gli Stati Uniti meridionali sono stati colpiti da una forte siccità.

Secondo Agrawal e Davis, lo studio evidenziava le vere cause, non legate alle asclepiadi, dei problemi sofferti dalla popolazione nelle fasi finali della migrazione. «Questo è l'articolo che le affronta nel modo più quantitativo», commenta Agrawal. Ci sono anche altri sospetti, delineati in modo più vago. Davis pensa che un protozoo parassita che infetta le farfalle monarca starebbe guadagnando posizioni in classifica. Secondo una ricerca condotta da sua moglie Sonia Altizer, anche lei etologa all'Università della Georgia, negli Stati Uniti meridionali i livelli di *Ophryocystis elektroscirrha* – che può indebolire o uccidere la farfalla monarca – sarebbero in aumento. Davis e altri ricercatori, inoltre, hanno suggerito che i cambiamenti dell'habitat abbiano peggiorato lo stress fisiologico delle farfalle migranti, indebolendone la resistenza durante il lungo tragitto autunnale.

National Geographic Image Collection

Un nuovo caso

Le nuove prove potrebbero indicare la presenza di più colpevoli del declino delle farfalle, anziché uno solo. Questa prospettiva ha convinto in parte persino Oberhauser. «Probabilmente la mia teoria che non stesse succedendo nulla lungo il percorso migratorio era troppo rigida», sottolinea la scienziata, oggi direttrice dell'orto botanico dell'Università del Wisconsin a Madison. Tuttavia Oberhauser crede ancora che la ferita più profonda sia quella legata alla diminuzione delle asclepiadi. «Conosco molto bene Andy e Anurag, ed entrambi – ha commentato – mi piacciono molto, ma sono un po' stanca di questo discorso» per cui il responsabile principale della decimazione delle farfalle invernali è qualcosa di diverso dall'annientamento delle asclepiadi. Come potrebbe restare nascosta una cosa che riesce a eliminare così tanti insetti in transito verso il Messico? Secondo un modello che ha usato insieme ad altri colleghi in uno studio del 2017, i numeri delle farfalle monarca sono influenzati significativamente solo dalla disponibilità di asclepiadi e dai cambiamenti meteorologici.

Oberhauser e Pleasants sostengono anche che i conteggi estivi che non mostrano alcuna riduzione – i numeri a cui si affidano Agrawal, Ries e Davis – presentano dei problemi: sono stati ottenuti da volontari che si sono avventurati raramente nei campi e quindi hanno trascurato le ingenti diminuzioni nelle popolazioni di quei luoghi. È logico, insiste Oberhauser, che debbano esserci dei cali durante l'estate. Se le popolazioni invernali delle farfalle monarca si stanno assottigliando sempre più, anno dopo anno, come è possibile che i discendenti di questo gruppo che si restringe molte volte recuperino gli elevati numeri estivi? «Da un punto di vista biologico non ha alcun senso».

Anche secondo Zipkin l'ipotesi della limitazione delle asclepiadi non è affatto fuori dai giochi. Come Oberhauser, ha trovato nei dati dell'Illinois prove del fatto che l'uso del glifosato, insieme a cambiamenti nel clima primaverile, può influenzare le abbondanze locali di farfalle monarca durante l'estate. Ha dichiarato: «Mi è difficile credere [...] che la quantità di asclepiadi nel paesaggio non stia influenzando le farfalle. La mia domanda è: fino a che punto lo fa?»

Questa è la domanda che si pongono tutti. Per trovare una risposta, gli scienziati hanno lanciato un'iniziativa di raccolta dati chiamata Integrated Monarch Monitoring Program, che intende effettuare conteggi statisticamente validi delle farfalle monarca correlati a variabili dell'habitat in centinaia di luoghi sparsi in tutti gli Stati Uniti continentali. I leader dell'iniziativa hanno selezionato i siti casualmente e hanno invitato scienziati professionisti ed entomologi dilettanti a monitorarli e a inviare i dati seguendo linee guida standard, in modo che i ricercatori possano individuare le tendenze. I volontari stanno raccogliendo dati dal 2017 e oggi 120 individui monitorano 235 siti. Come spiega Oberhauser: «Stiamo progressivamente crescendo».

Tutte le fazioni sono d'accordo: per aiutare la farfalla monarca non si può aspettare che siano stabiliti i fatti scientifici. In Messico, nel 2013, l'area forestale occupata dal lepidottero si è ristretta a un brandello poco più grande di un campo di calcio, un minimo da record. Anche se da allora la popolazione migratoria è aumentata un po', la maggior parte dei ricercatori la ritiene ancora in condizioni precarie. Lo U.S. Fish and Wildlife Service ha dichiarato che più avanti, nel corso dell'anno, si pronuncerà sulla richiesta di inserire la farfalla monarca tra le specie minacciate.

Per un miglioramento generale delle condizioni delle regioni in cui l'insetto ha il suo habitat, Oberhauser vorrebbe che lo U.S. Department of Agricolture aumentasse gli ettari del suo Conservation Reserve Program, il più importante programma federale a supporto delle aree naturali nei terreni agricoli: dal massimo raggiunto nel 2007 (quasi 15 milioni), gli ettari sono infatti scesi a meno di 9,3 milioni.

Sono necessarie, secondo i ricercatori, anche misure di conservazione per proteggere meglio le foreste messicane. Nonostante il nucleo centrale delle aree boschive sia ufficialmente protetto – fa parte del Patrimonio mondiale dell'umanità dell'UNESCO – nelle aree periferiche, dove le farfalle monarca trascorrono parte del tempo, la deforestazione continua e si sono insinuate piantagioni illegali di avocado. Il riscaldamento globale potrebbe rendere la riserva inospitale per gli abeti di cui si cibano gli insetti, alberi che hanno bisogno di temperature più basse. Sono già in atto iniziative per piantare abeti in aree più elevate e più fresche, lungo le pendici montane.

La farfalla monarca è molte cose per molte persone: un'ossessione per giardinieri e naturalisti, un punto di riferimento per i conservazionisti, un ambasciatore internazionale di buona volontà per i politici e, per gran parte dell'opinione pubblica, un serbatoio per le ansie sul crescente impatto dell'uomo sul nostro pianeta. Per gli scienziati, il mistero della migrazione delle farfalle monarca, iniziato nell'Ottocento e risolto nel secolo successivo, ha incoronato questo insetto come meraviglia della natura. Oggi la farfalla monarca è al centro di un ennesimo rompicapo e, questa volta, dalla soluzione potrebbe dipendere il suo destino. ■

PER APPROFONDIRE

Milkweed Loss in Agricultural Fields Because of Herbicide Use : Effect on the Monarch Butterfly Population. Pleasants J.M. e Oberhauser K.S., in «Insect Conservation and Diversity», Vol. 6, n. 2, pp. 135-144, marzo 2013.

Monarch Butterfly Population Decline in North America: Identifying the Threatening Processes. Thogmartin W.E. e altri, in «Royal Society Open Science», Vol. 4, n. 9, articolo n. 170760, settembre 2017.

Mechanisms behind the Monarch's Decline. Agrawal A.A. e Inamine H., in «Science», Vol. 360, pp. 1294-1296, 22 giugno 2018.

Multiscale Seasonal Factors Drive the Size of Winter Monarch Colonies. Saunders S.P. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 116, n. 17, pp. 8609-8614, 23 aprile 2019.

Una marea di satelliti

Le orbite più basse della Terra sono sempre più affollate

Per decenni il numero di satelliti in orbita attorno alla Terra è aumentato a un ritmo lento, ma di recente la crescita è diventata vertiginosa. A luglio 2019, lassù c'erano oltre 2200 satelliti. Negli anni ottanta e novanta, la protagonista è stata l'orbita geocentrica (*blu*), dice Jonathan McDowell, astrofisico del Center for Astrophysics|Harvard & Smithsonian. Ora però l'azione si svolge nelle orbite terrestri più basse (*giallo*) ed è sempre più dominata da aziende giovani invece che da governi, militari o accademici. Oggi la spinta proviene da Starlink, una costellazione di satelliti da 260 chilogrammi l'uno, lanciata da Space X per fornire Internet ad alta velocità. L'impennata è iniziata verso il 2014, in gran parte dovuta ai CubeSats, piccoli satelliti – ognuno pesa meno di 12 chilogrammi – lanciati in gruppi. Stanno esaudendo il desiderio di osservare cambiamenti sulla Terra ogni giorno. Per esempio, potrebbero rivelare quante persone si spostavano a Wuhan, in Cina, durante l'epidemia da coronavirus.

Mark Fischetti

Grafica di Nadieh Bremer; fonte dati: rapporto di Jonathan McDowell del 2019 (https://planet4589.org)

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

La donna che fiuta il Parkinson

L'approccio scientifico a dichiarazioni che sembravano paranormali ha portato a una scoperta singolare

Se una persona dimostrasse di avere un potere paranormale, come reagirebbe la scienza? Chi sta al di fuori del mondo scientifico spesso sospetta che ci sarebbero scetticismi a oltranza, che il fenomeno verrebbe ridicolizzato, negato e, se necessario insabbiato, pur di non dover ammettere di aver avuto torto e non alterare lo status quo.

In realtà la comunità scientifica ha già dimostrato che le cose non andrebbero così. Non lo ha fatto con poteri paranormali tradizionali, che tuttora restano confinati nella pseudoscienza perché nessuno di coloro che affermano di averli ha mai superato i controlli necessari per escludere frodi e autoinganni, ma con un potere che ha molto in comune con quelli paranormali: la capacità, a prima vista incredibile, di riconoscere il morbo di Parkinson semplicemente fiutando una persona.

Un olfatto superiore alla media

Joy Milne, un'infermiera scozzese, afferma di poter diagnosticare questo morbo basandosi solo sull'odore corporeo (suo marito ne era affetto). Ha un'acutezza olfattiva molto superiore alla media, per cui dice che al suo naso i malati di Parkinson risultano avere un odore caratteristico che le persone comuni non rilevano.

Nel 2012 Milne ha contattato Tilo Kunath, neurobiologo all'Università di Edimburgo, dove effettuava ricerche sul morbo di Parkinson, e gli ha chiesto il motivo di questo odore così particolare. Kunath, non avendolo mai percepito, inizialmente ha respinto l'asserzione straordinaria di Milne: mancava una ragione per cui una malattia neurodegenerativa avrebbe dovuto generare un odore corporeo. Ma successivamente ha letto ricerche che indicavano la capacità dei cani di fiutare i pazienti affetti da tumori e ha deciso di approfondire la tesi di Milne.

Ha sottoposto l'infermiera a un test di valutazione di 12 indumenti indossati da persone sane o affette dal morbo di Parkinson: la donna ha riconosciuto tutti e sei quelli appartenenti ai malati e ha dato un solo falso positivo, che però si è rivelato valido otto mesi più tardi, quando la malattia è stata diagnosticata al proprietario di quell'indumento.

Lontani da una diagnosi precoce

Un singolo esperimento così ristretto non è una prova inoppugnabile di un superpotere, tuttavia era comunque un indizio concreto sufficiente a stimolare la ricerca di un meccanismo che causasse un odore corporeo specifico nei malati di Parkinson. Lo spunto proposto da Milne, e sostenuto da altri esperimenti, è sfociato in un studio, pubblicato su «ACS Central Science» nel 2019, che indica che la fonte della sensazione olfattiva segnalata da Milne è il sebo dei malati, che contiene livelli alterati caratteristici di alcuni metaboliti volatili. Questi metaboliti hanno un odore molto simile a quello assegnato dalla donna al morbo di Parkinson.

Servono altri studi in doppio cieco per validare il tutto e resta ancora da trovare il meccanismo biologico che produce queste alterazioni; di conseguenza siamo ancora ben lontani dall'avere una diagnosi precoce basata su questa scoperta e fattibile con strumenti di laboratorio senza ricorrere al naso ipersensibile di una persona.

Ma è importante notare qual è stato l'approccio scientifico alle dichiarazioni «paranormali» di Milne: nessuna ridicolizzazione, ma esitazione iniziale seguita da cauto scetticismo e dalla ricerca attenta di conferme e di meccanismi che giustificassero le osservazioni. Joy Milne è indicata nello studio come coautrice: non solo il suo potere non è stato insabbiato, ma anzi il suo nome è entrato a far parte della scienza, che quindi conferma di richiedere una mente aperta e un fiuto speciale. Non solo per gli odori, ma per le scoperte.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Un effetto positivo

Da prodotti erotici, i lubrificanti personali sono diventati uno strumento per garantire il benessere femminile

Nei primi giorni di marzo, lo storico marchio di lubrificanti personali K-Y Jelly ha apportato una lieve modifica al proprio logo. Il quadrato rosso che separava le lettere K e Y è stato trasformato in un rombo. Niente di che sul piano grafico, non fosse che quel rombo richiama in maniera molto stilizzata l'organo sessuale femminile e segna, come spesso accade nella pubblicità, un cambio di strategia di vendita.

La storia dei lubrificanti affonda le sue radici nella notte dei tempi, fin dall'olio di oliva usato nella Grecia antica per agevolare i rapporti sessuali o dalle zuppe di alghe giapponesi dalle quali estrarre carragenina. La formalizzazione in prodotto vero e proprio è avvenuta agli inizi del secolo scorso, proprio con K-Y Jelly nato nel 1904 come lubrificante a uso medico e convertito in prodotto per uso personale nel 1917, seppur acquistabile solo con prescrizione medica. È degli anni ottanta la trasformazione in medicinale da banco o, qui da noi, in presidio medico chirurgico fino ad arrivare sugli scaffali dei supermercati.

Polimeri anti attrito

I lubrificanti, per definizione, hanno lo scopo primario di lubrificare, cioè di ridurre l'attrito e favorire lo scivolamento tra due superfici. Queste azioni sono possibili grazie alla loro peculiare composizione chimica. Quelli a base acquosa, i più diffusi e dei quali fa parte anche K-Y Jelly, vedono l'acqua come ingrediente principale, che può occupare fino al 90 per cento della formula. Sul mercato si trovano anche prodotti a base di oli e di siliconi che hanno caratteristiche differenti in termini di durata e di compatibilità con la pelle e con i materiali con cui entrano in contatto.

A seguire nella lista degli ingredienti troviamo gli umettanti, come il glicerolo che migliorano la lubrificazione e mantengono l'idratazione dei tessuti. Infine, al terzo posto compaiono i veri protagonisti: i polimeri. Uno tra i più utilizzati è l'idrossimetilcellulosa, un derivato della molecola vegetale trattato in modo da formare una specie di spugna che assorbe l'acqua e si gonfia creando a tutti gli effetti il gel. A seconda del tipo di polimero e della sua concentrazione cambia la consistenza del prodotto, ma non cambia la funzione che potremmo definire di «scivolosità» del prodotto.

Trattandosi di soluzioni acquose, un ruolo fondamentale è giocato dai conservanti. Non è raro trovarne molti elencati, dai parabeni all'acido benzoico, proprio per garantire la sicurezza del prodotto. Ma è altrettanto importante il ruolo dei regolatori di pH, come l'acido citrico o l'idrossido di socio, che rendono il prodotto fisiologicamente compatibile.

Una categoria inaspettata

Chimica a parte, un effetto collaterale, ma positivo, dell'uso dei lubrificanti è quello che porta a una riduzione delle irritazioni e alla prevenzione delle lesioni che possono dare origini a infezioni. Insomma, da prodotti erotici e anche un po' trasgressivi, i lubrificanti personali sono diventati uno degli strumenti per garantire il benessere femminile. Non per niente, in un mercato globale che ha raggiunto lo scorso anno un miliardo di dollari, il settore più grande di utilizzatori è rappresentato da una categoria inaspettata per quello che siamo abituati a pensare dei lubrificanti: le donne e, in particolare, le donne in menopausa.

Il motivo del cambio nella grafica del logo dell'azienda che ha dato il via al settore dei lubrificanti personali è tutto qui, e non è un caso che in commercio stiano aumentando sia la varietà di prodotti sia le proposte di principi attivi anti invecchiamento che possono avere una funzione importante nel coadiuvare l'azione lubrificante, ma che sono presentati con un marketing che ricorda molto quello dei prodotti antirughe.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Acque ricostruite

A metà Settecento, la moda delle acque termali stimolò la ricerca di metodi per produrre acqua gassata

"Per ogni gallone di acqua di fonte aggiungi uno *scruple* di magnesia, 30 *grani* di sale di Epsom, dieci *grani* di sale comune e un po' di filo o di limatura di ferro. Procedi come nel processo per impregnare l'acqua di *aria fissa*. Se vuoi conservare l'acqua, mettila in una bottiglia ben tappata e sigillata». Questa è la ricetta che il farmacista di Manchester Thomas Henry descriveva nel 1781, usando le unità di misura dei farmacisti dell'epoca per produrre un'acqua effervescente simile a quella della famosa stazione termale di Bad Pyrmont, in Germania.

Le presunte proprietà curative delle acque di molte sorgenti d'Europa, calde, effervescenti o con altre caratteristiche, hanno attratto in quei luoghi nei secoli i più benestanti per goderne i benefici sia con bagni sia bevendole. La crescente domanda anche in città lontane poneva un problema: l'acqua trasportata perdeva il gusto frizzante e in più si sedimentavano residui sul fondo.

La scoperta dell'aria fissa

Alcuni studi avevano mostrato che il modo più semplice per riprodurre il sapore di molte acque minerali era farle evaporare, recuperare il residuo, e ridisciogliergli in sufficiente acqua pura. Le prime analisi chimiche, benché rudimentali, avevano anche mostrato come quei residui contenessero sostanze chimiche conosciute e comuni, come cloruro di sodio o solfato di ferro. Subito si iniziò a ricostruire in laboratorio le varie acque partendo dai singoli reagenti. Quello che mancava però era un modo per reintrodurre l'effervescenza che si pensava fosse essenziale per le loro proprietà.

Nel 1750 Gabriel François Venel, un chimico dell'Università di Montpellier, scoprì che aggiungendo all'acqua del carbonato di sodio e una piccola quantità di acido cloridrico si otteneva un'acqua con un sapore simile a quella di Selters, una località della Germania con un'acqua molto effervescente. L'osservazione chiave arrivò dal chimico scozzese Joseph Black che nel 1752 scoprì che riscaldando o trattando con acidi il calcare si liberava un gas che chiamò «aria fissa». Più tardi Antoine Laurent Lavoisier avrebbe correttamente identificato il gas come anidride carbonica.

Verso l'industria

Joseph Priestley, personaggio eclettico che diede contributi fondamentali alla nascente disciplina della chimica – come la scoperta dell'ossigeno – nel 1767 iniziò a fare esperimenti sull'aria fissa. Viveva vicino a un birrificio e poteva fare esperimenti a volontà con i gas liberati dalla fermentazione. In un esperimento lasciò per una notte intera un piatto pieno d'acqua vicino alla superficie della birra in fermentazione scoprendo che si impregnava di gas a sufficienza per donarle un buon sapore. Successivamente, seguendo Black, provò a impregnare l'acqua usando calcare e acido solforico per produrre il gas. Inventò anche un piccolo apparecchio per produrre quest'acqua che venne persino installato su due navi britanniche.

Fu però Thomas Henry, il farmacista di Manchester, a inventare un metodo per produrre acqua gassata al ritmo di circa 40 litri alla volta. L'apparato consisteva di una piccola bottiglia dove venivano posti sassetti di marmo insieme ad acido solforico. L'anidride carbonica era raccolta tramite un tubo in una sacca impermeabile che periodicamente veniva schiacciata per convogliare il gas liberato in un barile d'acqua per «gassarlo».

Ma fu un gioielliere svizzero di nome Johann Jacob Schweppe a produrre per primo su scala industriale, nel 1783 a Ginevra, acque addizionate di vari gas, dall'anidride carbonica all'idrogeno. La *Schweppes* esiste ancora ma nonostante consideri Priestley «il padre della nostra industria» il chimico britannico non ci guadagnò mai nulla.

Bollicine salutari. L'effervescenza era ritenuta essenziale per riuscire a replicare gli effetti benefici delle acque delle stazioni termali più famose.

Rudy e Piotr prendono un treno per Zurigo, ma non rispettano la prenotazione del posto. Quale sarà la probabilità di sedersi a quello giusto?

Alta velocità, bassa prenotazione

La Limmat è un fiume molto serio. Forse perché è svizzero, e gli svizzeri sono seri per definizione; forse perché nasce già adulto, come fanno solo gli emissari dei laghi che non hanno immissari, come è lo Zürichsee, il lago di Zurigo; o forse perché sente appieno la responsabilità di essere un elemento cardine dell'austera città elvetica. Nella tradizione della patria di Guglielmo Tell, ogni città svizzera è veramente tale solo se possiede almeno alcuni attributi ben precisi: un lago, o un fiume, o una montagna, o una stazione ferroviaria; ma in fondo è un solo un trucco, perché la stazione ferroviaria ce l'hanno proprio tutte. Fatto sta che l'Hauptbahnhof di Zurigo viene proprio quasi accarezzata dalle acque della Limmat, e mentre Rudy cammina lungo la Bahnhofquai, sia il serio fiume che l'augusta stazione sembrano avere la medesima espressione stupita e quasi scandalizzata di Alice e Doc, sentendo l'amico fischiettare allegramente il ritornello di *Long Train Running* dei Doobie Brothers.

«È in piena *top ten* dei miei brani preferiti – mormora Piotr ad Alice – ma avrei scommesso un mese di stipendio che Rudy non lo conoscesse neppure. Figuriamoci che sapesse fischiettarlo...»

«Io invece sono stupita del fatto che sembrate entrambi allegri e rilassati», dice Alice. «Quando vi ho chiesto di raggiungermi a Zurigo già paventavo di veder scendere dal treno i soliti due musi lunghi che avete sempre dopo aver passato più di due ore insieme senza potermi usare come capro sacrificale delle vostre sciocchezze. Anche se, a dirla tutta, temevo di più che il resto del vagone si fosse finalmente deciso a linciarvi, com'è già quasi capitato un paio di volte. E invece...»

«Tranquilla, Treccia – gongola Rudy, disoccupando le labbra dal fischiettare e occupandole nella tradizionale attività di supporto per pipa – nessun linciaggio neanche stavolta, ma scommetto che un bel numero di cittadini svizzeri parleranno a lungo di questo viaggio. Forse non proprio tutti e 98, ma conoscendo la loro predisposizione allo scandalo, quasi.»

«Novantotto. Ecco che arriva già un numero, anche se avevo pregato di considerare questa vacanza come una vacanza anche dai problemi. Vogliamo toglierci presto il dente? Se è così, sbrigati, che di questa stagione le acque del lago sono ancora freddine, e non vorrei sentirmi troppo in colpa, dopo che ti ci avrò buttato dentro.»

«Ma no, Alice – sminuisce Piotr – alla fin fine è solo un effetto collaterale del solito rigore sulla puntualità del Capo.»

«Non edulcorare i termini, Doc; sono uno scienziato, non ho paura delle parole neanche quando sono dure e riguardano me stesso. Io non sono affetto da "rigore sulla puntualità", ma da una vera e propria "isteria da anticipo". E comunque, Treccia, è presto detto: odio l'idea di perdere una coincidenza e arrivo sempre al binario con grande anticipo. Stavolta ho forse esagerato un po', perché il treno per Zurigo era già bello pronto, col capostazione che si apprestava a fischiare la partenza.»

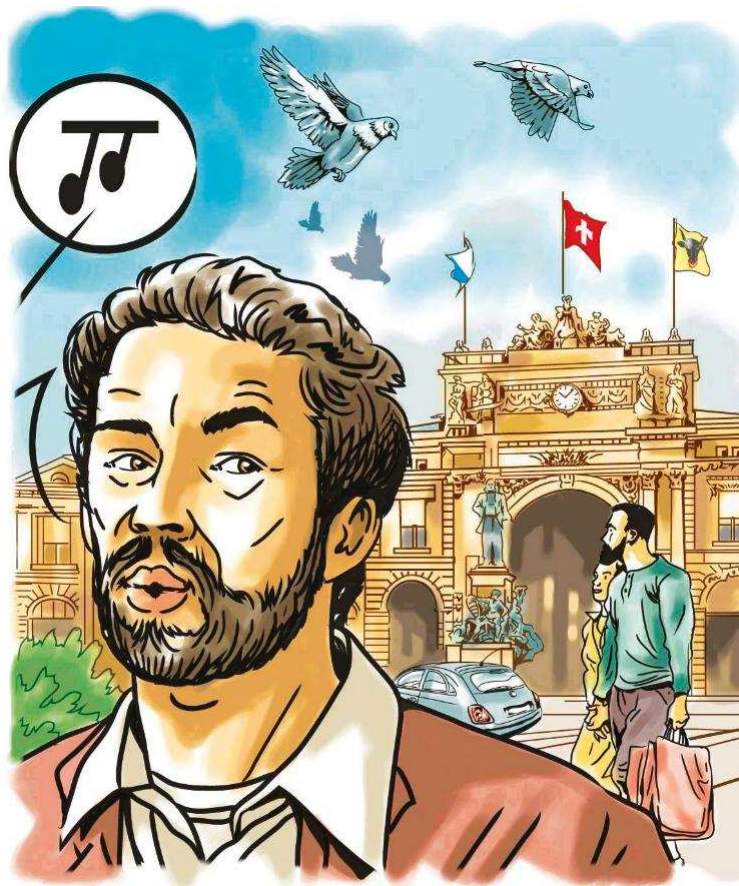



Illustrazione di Stefano Fabbri

«Come? Allora non eri per niente in anticipo...»

«Scherzi? Si trattava ovviamente del treno prima del mio. Ce ne sono più o meno uno ogni due ore, e così...»

«Non sarai salito, spero. Con la prenotazione per il treno successivo, avresti rischiato di... »

«Lo so, lo so. Conscio di questo, mi sono armato di pazienza e messo ad aspettare che componessero il treno destinato ad accogliere le mie anticipanti e stanche membra...»

«Come hai detto che si chiama, questa malattia? Isteria? Mi sembra giusto sia il termine che la punizione che hai scontato.»

«Oh, lieto di sentire che il tuo sarcasmo gode ancora di buona salute. Comunque, beh, mi sono sentito un po' contrariato. Al punto che ho pensato di attuare una sofisticata protesta.»

Alice sgrana gli occhi: «Ma perché "contrariato", poi? Sono si-

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a giugno e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI APRILE

Due problemi proposti il mese scorso. Uno riguardava i primi 2002 numeri naturali: due giocatori, a turno, ne scelgono uno alla volta, fino a esaurimento; ripartizione completata, si sommano tutte le cifre meno significative (insomma, solo le unità) e chi ha il totale più alto vince. L'altro si basava su 11 pile di 10 pedine da dama ciascuna; ogni giocatore a turno può prendere 1, 2 o 3 pedine a scelta, con la regola che il primo deve prenderne una ciascuna da 1, 2 o 3 colonne contigue, mentre l'altro può prenderne sempre 1, 2 o 3, ma tutte dalla stessa colonna; vince chi fa l'ultima mossa.
Nel primo gioco, il primo giocatore ha una strategia di vincita: immaginiamo i numeri da 1 a 2000 «accoppiati» nella forma (k, $1000 + k$), con k che va da 1 a 1000. Se i giocatori si suddividono equamente le coppie, le somme delle loro cifre meno significative saranno uguali. Il primo giocatore può vincere scegliendo inizialmente il numero 2002, e poi scegliere sempre l'elemento della «coppia» corrispondente a numero pronunciato dal secondo giocatore. Questi alla fine si ritroverà con il solo residuo 2001, che sarà perdente contro il 2002 scelto inizialmente dal primo giocatore.
Nel secondo gioco, la strategia vincente esiste per il secondo giocatore. Lo si può capire costruendo un modello bidimensionale delle pedine ponendole su un quadrato 11×11, con l'accortezza di lasciare una «diagonale» vuota, libera da pedine. Si vede in questo modo che le mosse permesse del primo giocatore sono mosse orizzontali, mentre quelle del secondo sono verticali; le caselle vuote della diagonale lasciata libera devono semplicemente essere ignorate.
Con questo modello, il secondo giocatore potrà sempre replicare, dal proprio «punto di vista», la mossa del primo: l'ultima mossa sarà pertanto comunque sua.

cura che il treno giusto era prontissimo all'ora giusta: l'unica cosa più precisa degli orologi svizzeri sono i treni svizzeri. Quindi, che cosa c'era da contrariarsi e protestare?»

«Ma, diamine! Proprio perché sono svizzeri e precisi come tali! Da loro mi aspetto profondo rispetto per chi, come il sottoscritto, per garantire adeguatamente la puntualità, arriva al binario con due o tre misere centinaia di minuti in anticipo. E invece, niente! Solo un binario vuoto come le tasche d'un disoccupato spendaccione. Così, per protesta, quando il treno giusto è arrivato mi sono seduto sul posto che più mi aggradava, ignorando quanto c'era scritto sulla prenotazione. Così imparano.»

Gli occhi di Alice cercano conferma in quelli di Doc, ma Piotr li tiene celati sotto il palmo della mano.

«Cosa è successo, dopo?»

«Oh, niente... Gli altri viaggiatori sono arrivati man mano. Il vagone era da 100 posti, alla fine erano tutti occupati, e...»

«Ma quando è arrivato lo svizzero che aveva prenotato il posto dov'eri seduto tu, che è successo? Ti sei sorbito una filippica in tedesco sugli *Italiener*?»

«Mah, devo dire che un po' me la aspettavo, ma non ho avuto soddisfazione. I nostri compagni di viaggio si sono mostrati meno intransigenti di te. Arrivavano uno a uno e, se il loro posto era libero, ovviamente lo occupavano. Se invece era già occupato da qualcuno, accennavano un elvetico aggrottar di sopracciglia, ma poi sceglievano quello che reputavano il migliore tra i posti liberi e ci si accomodavano, senza darsi tutte le pene che mi sarei aspettato.»

«Me le sarei aspettate anche io. Ma tu, Doc? Ti si adeguato a questo atteggiamento tollerante da svizzeri devianti?»

«Eh, io? No... anche se avessi voluto, non avrei potuto, Alice. Proprio come è certo che Rudy sarà sempre il primo ad arrivare a un treno, è altrettanto certo che io sarò sempre l'ultimo. Sono arrivato, ho visto che c'era un unico posto libero e mi ci sono seduto, senza neanche stare a guardare se fosse il mio o no. E devo dire che mi sentivo addosso 198 occhi (senza contare gli occhiali) ciascuno carico di uno sguardo di disapprovazione nei miei confronti, mentre nessuno guardava Rudy.»

«Calma, 198 diviso due fa 99... perché anche tu lo guardavi storto, Capo?»

«Per lo stesso motivo di tutti gli altri: era quasi in ritardo! Comunque, forse anche grazie a questa comunanza di riprovazione verso un capro espiatorio, il viaggio è stato divertente per tutti: io avevo un grazioso problema da risolvere, un bel numero di elvetici avevano provato l'ebbrezza di violare una regola, e...»

«Aspetta, Capo, ho un paio di domande. La prima è: che problema?»

«Non credo ti piacerà: qual è la probabilità...»

«...che Doc si sia seduto proprio al suo posto prenotato? No, non mi piace, lo lascio volentieri a qualcun altro. La seconda domanda non è per te: Doc, perché il tuo viaggio è stato piacevole?»

«Ma scherzi? Un intero viaggio in treno lontano da Rudy? Un vero paradiso!»

Le meraviglie dell'evoluzione

Il ruolo della bellezza nel mondo animale, tra forme, suoni e colori

L'incanto degli animali
di Christiane Nüsslein-Volhard
Il Saggiatore, Milano, 2020, pp. 116 (16,00 euro)

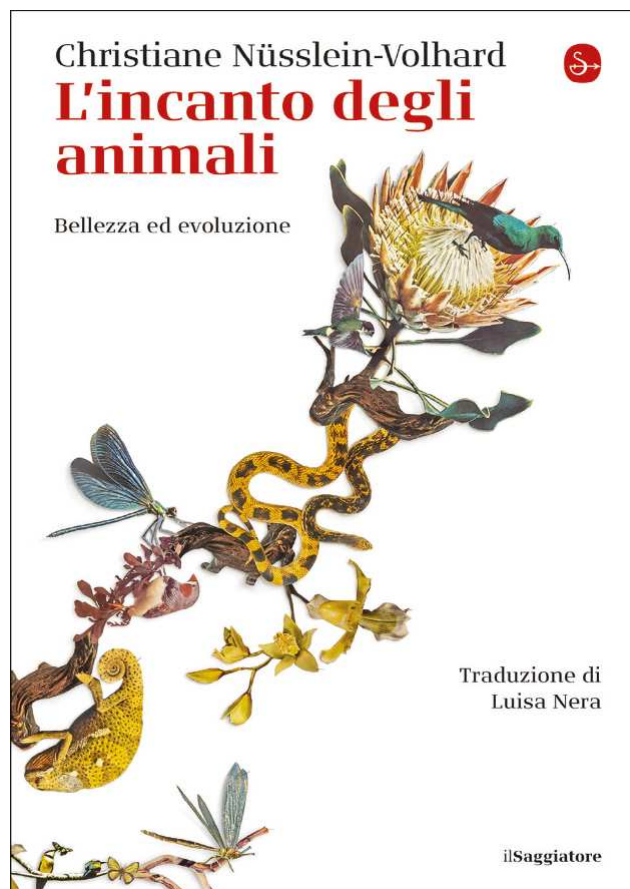
Probabilmente l'avrete incrociato in qualche acquario casalingo. Il pesce zebra, con le sue strisce orizzontali blu e dorate, oltre a essere tra le specie predilette dagli acquariofili, negli ultimi trent'anni è diventato un animale modello di riferimento per i biologi dello sviluppo. Depone uova piuttosto grosse e all'inizio trasparenti, che permettono di seguire facilmente le prime fasi dello sviluppo dell'embrione, e il suo genoma è relativamente facile da modificare per ottenere mutanti.

Tra le cose che i pesci zebra ci stanno aiutando a capire c'è la costruzione dei disegni che adornano la pelle dei vertebrati. Le strisce colorate dei pesci zebra sono il frutto di una complessa e precisa stratificazione di diversi tipi di cellule che contengono pigmenti – melanofori, iridofori e xantofori – che migrano durante le prime settimane di sviluppo dell'individuo per colonizzare la pelle. Sembra che l'organizzazione di queste cellule non sia preordinata ma sia frutto di un'autorganizzazione tra i diversi tipi di cromatofori che attraendosi e respingendosi si dispongono a formare infine le strisce alternate.

Christiane Nüsslein-Volhard è tra coloro che hanno approfondito in maniera più dettagliata questi meccanismi, iniziando a studiare questi pesci negli anni novanta, dopo molto tempo speso ad analizzare il controllo genetico dello sviluppo precoce nei moscerini della frutta, che le valse il premio Nobel per la medicina nel 1995 insieme a Edward Lewis ed Eric Wieschaus.

I meccanismi della morfogenesi avevano suscitato già negli anni cinquanta l'interesse del padre dell'informatica Alan Turing, ma è solo nel 1972 che viene avanzata da Alfred Gierer e Hans Meinhardt una solida teoria matematica della formazione dei *pattern* biologici, che si basa sull'interazione tra due sostanze morfogenetiche, un attivatore e un inibitore, e fornisce un possibile modello di interpretazione dello sviluppo. A oggi però, sottolinea l'autrice, le molecole che dovrebbero svolgere questo compito in molti casi non sono state identificate. E per esempio di come si originino colori e disegni tra gli uccelli sappiamo ancora molto poco.

L'aspetto forse più interessante di questo libro è il ricorrere frequente delle domande che la grande biologa continua a porsi nel suo lavoro di ricerca. Nel testo prova a confrontarsi con gli interrogativi che già Charles Darwin si poneva nel 1871 in *L'origine dell'uomo e la selezione sessuale* sul ruolo della bellezza nel mondo animale. E così ci ritroviamo tra uccelli del paradiso, pavoni e uccelli giardinieri che allestiscono il nido esteticamente più attraente per l'accoppiamento, o a esplorare la struttura delle penne degli uccelli per capire come nascono le sfumature verdi e blu.

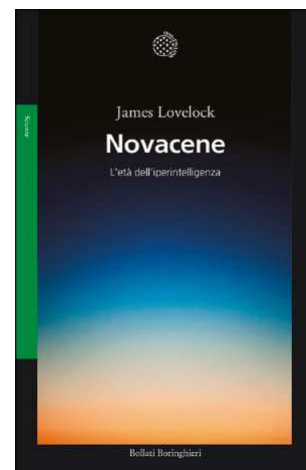
Alla domanda fondamentale se anche gli altri animali apprezzino la bellezza, la biologa tedesca, mettendo in guardia da ogni antropomorfizzazione, risponde: «È indubbio che alcuni elementi estetici provochino un piacere, che siano «esteticamente gradevoli», ma questo vale solo per le femmine della specie che sono molto sensibili al fascino dei maschi quando questi esibiscono le loro penne o il loro canto; infatti quegli stessi segnali mettono in fuga o spingono alla battaglia i maschi della specie. Anche l'attrattività è in ogni singola specie del tutto limitata al disegno o al segnale tipico della specie, mentre altri disegni e segnali, altrettanto belli o per noi anche più belli, vengono del tutto ignorati. I disegni risultano attraenti soltanto per gli appartenenti a una certa specie, e non per gli altri animali.»

Un libro pieno di spunti di riflessione, aggraziato dagli splendidi acquerelli di Suse Grützmacher, e dal privilegio di osservare la natura con gli occhi di Nüsslein-Volhard, che risente però di una scrittura fin troppo asciutta, a cavallo tra un diario di laboratorio e un manuale di biologia.

Marco Motta

Dopo l'Antropocene

Una nuova provocante proposta del padre di Gaia

Non è ancora stato accettato come era geologica, se mai lo sarà, ma qualcuno comincia già a pensare al dopo Antropocene. E se a farlo è un pensatore fuori dagli schemi come il centenario James Lovelock, si può essere certi che anche questo libro non passerà inosservato e provocherà molte reazioni, a favore e contro.
Innanzitutto, Lovelock è ottimista sul futuro della Terra. Il complesso sistema autoregolante che quarant'anni fa lo stesso Lovelock chiamò Gaia ha, per così dire, tutto l'interesse a riuscire a superare la crisi causata dal riscaldamento globale, perché dalla sopravvivenza della biosfera di cui facciamo parte anche noi dipende la sopravvivenza di Gaia come organismo.
Altro assunto è che l'intelligenza artificiale genererà presto una nuova forma di vita iperintelligente. Ma, almeno inizialmente, a questi cyborg non sarà utile eliminare *Homo sapiens*, perché anche la nostra specie fa parte del complesso sistema regolatorio del pianeta; quindi i cyborg sarebbero interessati alla sopravvivenza della vita organica per garantire la loro.
Dalla nuova forma di intelligenza non si arriverebbe a una guerra tra esseri umani e macchine, come quelle raccontate dalla fantascienza. Al contrario, Lovelock prevede una temporanea, come minimo, mutua collaborazione per la sopravvivenza di Gaia.
Su queste due linee di ragionamento si sviluppa il ritratto della nuova era, il Novacene, che potrebbe già essere cominciato senza che ce ne fossimo accorti e che potrebbe portare a una reale conquista del resto dell'universo da parte di una forma di intelligenza.
Molte delle idee espresse in questo libro non sono argomentate in profondità, perché basate su una forma di comprensione intuitiva, come era per l'ipotesi Gaia. Questo modo di procedere può disturbare il lettore più abituato all'argomentazione e al ragionamento logico, ma è innegabile che provochi nuove domande. E alimentare dibattiti, stimolare e guardare il monda da prospettive originali sono sempre stati gli interessi principali di Lovelock.

Marco Boscolo

Novacene
di James Lovelock
Bollati Boringhieri, Torino, 2020,
pp. 128 (euro 18,00)

Rivelare un mondo nascosto

Il contributo della microscopia alla conoscenza scientifica

Una larga parte del mondo sfugge ai nostri organi di senso e, in particolare, alla vista. Le scienze naturali ci hanno insegnato che la realtà vista dalle varie specie, che la osservano con occhi modellati in modi differenti dalla loro storia evolutiva, ha un aspetto radicalmente diverso, perché non a tutti gli esseri viventi è utile percepire le stesse cose. Oltre al limite rappresentato da quelle lunghezze d'onda che si collocano al di fuori dello spettro visibile, c'è anche tutto quello che è troppo piccolo per essere colto dal nostro mezzo visivo e non per questo è meno interessante. Virus, batteri, cellule, tessuti e molto altro sono elementi che per essere osservati hanno bisogno di strumenti che hanno contribuito in modo sostanziale all'ampliamento delle nostre conoscenze: i microscopi. Alberto Diaspro, direttore del Dipartimento di nanofisica all'Istituto italiano di tecnologia e professore ordinario all'Università di Genova, decide in questo libro di percorrere la storia e raccontare le meraviglie di questi rivelatori dell'invisibile.
L'entusiasmo dell'autore per la materia è tangibile: lo stile è coinvolgente, punteggiato di citazioni e aneddoti tratti dalla storia e dalle vicende personali di chi scrive. Inevitabilmente questo entusiasmo si trasmette anche al lettore, che viene guidato a comprendere la reale portata del contributo della microscopia alla scienza.
Un contributo che non si è senz'altro esaurito, come si scoprirà nel corso della trattazione, in particolare nell'ultima parte dedicata al futuro di questa tecnica. In quest'ottica, è proprio il caso di dirlo, si comprende anche la scelta di non abbassare troppo il livello, lasciando spazio anche a parti più tecniche e alle relative formule. Una scelta forse impopolare, ma necessaria, sottolinea l'autore, a bilanciare le esigenze della divulgazione con quelle del rigore, senza confinare gli aspetti più complessi in box astratti dal contesto. «Il suggerimento è quello di leggere le formule come testo, come il testo di una poesia», dice Diaspro. D'altronde, già Galileo sottolineava la necessità di avvicinarsi al linguaggio con cui è scritto l'universo, che è quello della matematica.

Anna Rita Longo

Quello che gli occhi non vedono
di Alberto Diaspro
Hoepli Editore, Milano, 2020,
pp. 192 (euro 12,90)

La complessità dell'acqua

I risvolti delle nostre relazioni con questa risorsa preziosa

Chissà quanti dei milioni di turisti che mettono la mano nella Bocca della Verità sanno che la stanno infilando in un tombino. Il celebre mascherone, infatti, non era altro che un chiusino della Cloaca Maxima, testimone di una concezione delle fogne e delle acque ben diversa dalla nostra. «Senza la Cloaca Maxima, Roma sarebbe rimasta un villaggio di pastori assediati dalle malattie e dalla puzza.» Oggi, nelle fogne del mondo, anziché dee troviamo mostri: i *fatberg*, ammassi a volte colossali di «olio vegetale, grasso, salviettine, preservativi, pannolini, avanzi, creme per il viso, feci», un cui frammento trova posto in un museo.
Sono alcuni degli aneddoti narrati da Edoardo Borgomeo. Ricercatore all'Environmental Change Institute dell'Università di Oxford, consulente in gestione di risorse idriche per governi e organismi internazionali, Borgomeo non affronta gli aspetti tecnici o scientifici della materia. Narra invece nove storie, ricche di informazioni e riflessioni stimolanti, che esplorano i risvolti sociali e umani delle nostre relazioni con l'acqua. Dall'acqua sporca delle fogne a quella pura che diventa merce rara in sempre più città, anche ricche. Dalla forza distruttiva vista in Bangladesh con gli occhi di Namrata, raccoglitrice di gamberetti, a quella produttiva ma spesso problematica, per esempio per i danni delle dighe. Dal suo ruolo nel creare conflitti a quello nell'unire le comunità.
Il libro è rivolto a «chi l'acqua non la conosce o la conosce poco», perché la sua gestione «non è solamente compito di ingegneri, economisti o ecologi, ma è compito di tutti». Perciò Borgomeo si è riproposto, con successo, di dare un'idea della sua complessità. Superando l'«idrofobia» di una società che, quando non dà l'acqua per scontata, la considera solo come fonte di cataclismi o di conflitti, o preda di appropriatori senza scrupoli. Arrivare a una sua gestione sostenibile non è una questione tecnica, quindi, ma culturale: ci vuole anzitutto una visione più «idrofila», che «non è addomesticare né temere l'acqua», ma va costruita cambiando il nostro modo di vederla.

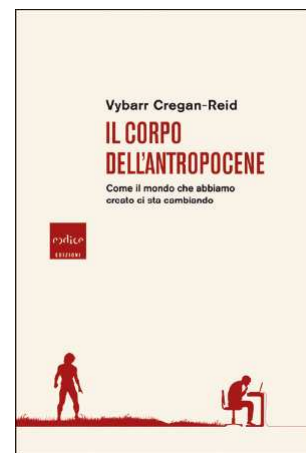
Giovanni Sabato

Oro blu
di Edoardo Borgomeo
Laterza, Bari-Roma, 2020,
pp. 176 (euro 14,00)

Un corpo obsoleto

Evoluzione e nuovi di stili di vita non vanno di pari passo

La strada alle nostre spalle è molto lunga. Centinaia di migliaia di anni se guardiamo solo alla specie *Homo sapiens*, qualche milione se risaliamo il cespuglio evolutivo fino agli australopitechi. Il cammino ci ha segnato, ma non abbastanza. Da un lato, ci siamo evoluti diventando una specie in grado di costruire computer, scatenare risse sui *social network*, modificare (spesso in peggio) il pianeta in cui viviamo e cambiare stile di vita in modo radicale. Dall'altro, il nostro organismo non è mutato sufficientemente da non risentire del cambiamento di stile di vita. Il «corpo dell'Antropocene» è quindi il risultato di questa tensione, e viene osservato in dettaglio nei vari capitoli di questo libro.
Correlando cambiamenti di dieta, lavoro, attività fisica, con le conoscenze della biomedicina contemporanea, il giornalista Vybarr Cregan-Reid costruisce un percorso stimolante, divertente e accurato che segue la cronologia della nostra specie: da quando abbiamo cambiato dieta, diventando agricoltori, che cosa è cambiato, e cosa è rimasto uguale? Come facciamo ad allineare uno stile di vita che cambia molto rapidamente con un corpo che ha tempi darwiniani lenti? Per esempio, la colonna vertebrale ha messo millenni ad adattarsi al bipedismo, ma poi nel giro di pochi secoli abbiamo inventato le sedie e un gran numero di lavori ripetitivi e sedentari. L'evoluzione non va al passo delle sedie da ufficio e del *mouse*, e quindi il mal di schiena è la maggiore (non la più grave) causa di perdita di giorni di lavoro a livello globale. Dal punto di vista della vertebra, è molto più usurante un pomeriggio al computer che ore di camminata. Mentre alcuni studi mostrano come la miopia sia correlata allo stare poco all'aperto nell'infanzia.
Per alleviare i disagi dovuti al *mismatch*, la mancata corrispondenza tra il nostro corpo attuale e l'ambiente in cui ci troviamo, alla fine dei diversi capitoli (che identificano le diverse epoche della nostra specie) troviamo anche consigli basati sulle attuali prove e almeno in teoria facili da mettere in atto. Spoiler: muovetevi, pandemie, lavoro e social network permettendo.

Mauro Capocci

Il corpo dell'Antropocene
di Vybarr Cregan-Reid
Codice Edizioni, Torino, 2020
pp.416 (euro 31,00)

Prossimo numero

a giugno

La prima molecola dell'universo

di Ryan C. Fortenberry

È stata finalmente rilevata una molecola da tempo prevista, l'idruro di elio, HeH^+, che si ritiene sia stato il primo composto formatosi nell'universo. Si tratta di una delle nuove scoperte che stanno cambiando le nostre idee sulla chimica dello spazio.

Dossier: La lotta al coronavirus

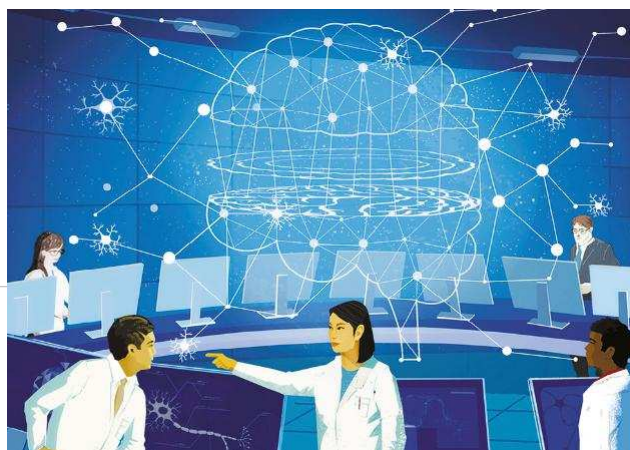
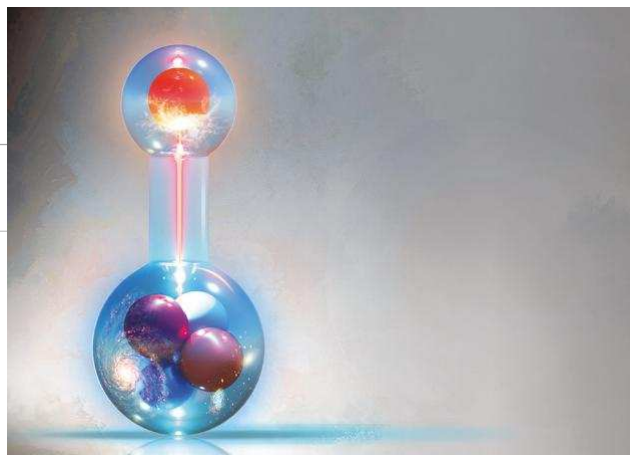
di L. Denworth, A. D'Errico, D. Ovadia, J. Qiu, C. Schmidt e M. Waldholz

Per arginare o sconfiggere il virus SARS-CoV-2 scienziati di tutto il mondo progettano farmaci, vaccini e misure di contenimento. Inoltre cercano di comprendere meglio gli effetti di Covid-19, la malattia causata dall'infezione, inclusi quelli psicologici sul personale sanitario che lo affronta in prima linea con i pazienti.

Materia bianca intelligente

di R. Douglas Fields

Recenti ricerche suggeriscono che la mielina, il materiale isolante che circonda i cavi di connessione tra i neuroni, abbia un ruolo decisivo nell'apprendimento, regolando la velocità di trasmissione dell'informazione attraverso le reti neurali.

Elena Hartley (*molecole*); Eva Vazquez (*laboratorio*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
Il responsabile del trattamento dei dati raccolti in banche dati di uso redazionale è il direttore responsabile a cui è possibile rivolgersi scrivendo a privacy@lescienze.it per i diritti previsti dal Regolamento (UE) 2016/679 sulla protezione dei dati personali.

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - aprile 2020

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting Editor in Chief
Curtis Brainard
President
Dean Sanderson
Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *La prima storia;* Silvio Ferraresi: *Mappe neurali per orientarsi nella vita;* Eva Filoramo: *Che cosa sta accidendo le farfalle monarca?* Daniele Gewurz: *Una crisi cosmica;* Lorenzo Lilli: *La soluzione H2;* Alfredo Tutino: *Nuovi geni da zero, La prima storia.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018